



Universidade de Aveiro

Departamento de Engenharia Civil

2017

**Sara Raquel Couto de
Magalhães**

**VULNERABILIDADE SÍSMICA EM EDIFÍCIOS EM BETÃO
ARMADO: APLICAÇÃO À ÁREA URBANA DA CIDADE DE FARO**



**Sara Raquel Couto de
Magalhães**

**VULNERABILIDADE SÍSMICA EM EDIFÍCIOS EM BETÃO
ARMADO: APLICAÇÃO À ÁREA URBANA DA CIDADE DE FARO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Professor Doutor Tiago Miguel dos Santos Ferreira, investigador de pós-doutoramento no Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE) da Universidade do Minho e do Professor Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

À minha avó, Lucília Oliveira e aos meus pais, Lucília e Manuel.

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Ricardo Joel Teixeira Costa
professor auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente
professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Deixo aqui a minha profunda gratidão a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para esta dissertação e me acompanharam ao longo de todo o percurso académico.

Ao Professor Romeu Vicente pela oportunidade de trabalhar com um profissional por quem tenho tanta consideração, pela confiança que depositou em mim, pela partilha de conhecimento e pela disponibilidade ao longo deste trabalho, o meu muito obrigada.

Ao Professor Tiago Ferreira pela transmissão de conhecimento, por toda a ajuda, pela incansável disponibilidade e pela enorme contribuição na elaboração desta dissertação.

Ao Professor Hugo Rodrigues pela partilha de conhecimento, simpatia e disponibilidade.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À Câmara Municipal de Faro, à Arquiteta Teresa Valente, que tornaram possível a execução do trabalho com a partilha do conhecimento sobre a cidade de Faro.

A todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo deste percurso académico.

À Filipa Pinto, Margarida Ferreira, Emanuel Pereira, Pedro Costa e Marina Conceição, sempre incansáveis no apoio em todos os momentos, mostrando toda a sua amizade e, que de início ao fim, foram imprescindíveis no meu sucesso a nível pessoal e académico.

A todas as atletas, que ao longo dos anos passaram pelas “minhas mãos”, que seja um exemplo que com trabalho tudo é possível e que independentemente das nossas escolhas o mais importante é fazer aquilo que nos torna mais felizes. Ao meu avô Couto, que mesmo não me vendo iniciar este percurso académico, sei que teria muito orgulho em mim e naquilo que me tornei ao longo destes anos.

À minha avó Lucília, que desde cedo me ensinou a fazer as primeiras contas e por quem eu guardo uma enorme consideração da forma como cuidou de mim e participou na minha educação, passando-me os valores da compreensão e do saber dar.

Aos meus pais, Lucília e Manuel, pelo amor e apoio incondicional independentemente das minhas escolhas e por me ensinarem que com trabalho e dedicação tudo se torna possível. O meu enorme obrigada pela ajuda na concretização dos meus sonhos.

Aos meus irmãos, Ana e Diogo, pela paciência, pelo amor e pelos constantes incentivos ao longo desta caminhada, ensinando-me que “o não é sempre garantido”.

A todos, muito obrigada de coração!

palavras-chave

Vulnerabilidade sísmica, edifícios de betão armado, índice de vulnerabilidade, grau de dano, SIG, Faro.

resumo

Os sismos são desastres naturais que ao longo dos anos têm assolado várias regiões do mundo inteiro. A vulnerabilidade sísmica dos edifícios é um tema que tem ganho crescente importância, devido às perdas humanas e económicas que se vão contabilizando de sucessivos eventos.

A presente dissertação aborda o tema da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado, aplicando uma metodologia desenvolvida a uma zona urbana da cidade de Faro. Esta metodologia avalia um conjunto de parâmetros importantes para análise do comportamento estrutural dos edifícios de uma forma relativamente rápida e em larga escala. Através desta avaliação é possível avaliar edifício a edifício, e identificar quais os edifícios que necessitam de uma intervenção de reforço sísmico. Os resultados obtidos foram analisados e representados espacialmente com auxílio de uma ferramenta SIG.

Após análise dos valores obtidos do índice de vulnerabilidade e do grau de dano médio estudou-se o impacto resultante da aplicação de uma intervenção de reforço nos edifícios com potenciais problemas de *soft-storey*, de forma a melhorar o comportamento estrutural dos edifícios em estudo. Os resultados obtidos após o reforço refletem a melhoria do comportamento sísmico das estruturas.

Avaliou-se do ponto de vista comparativo a eficiência da intervenção de reforço, a partir da análise: graus de dano físico e de perdas económicas. É importante provar que as ações de mitigação da vulnerabilidade sísmica, nomeadamente o investimento em medidas de reforço sísmico traduzem-se num balanço económico positivo.

keywords

Seismic vulnerability, reinforced concrete buildings, vulnerability index, degree of damage, GIS, Faro.

abstract

Earthquakes are natural disasters that have devastated several regions of the world over the past years. The seismic vulnerability of existent buildings is an issue that has gained importance due to human and economic losses that are being accounted for in the sequence successive events.

The present dissertation is focused on the assessment of the seismic vulnerability of reinforced concrete buildings, applying a simplified methodology developed to an urban area of the city centre of Faro. This methodology evaluates a set of parameters that rule the structural behaviour of buildings. in a fast way and on a large scale. Through this evaluation it was possible to evaluate the vulnerability building by building and identify which buildings may require intervention to improve its seismic behaviour. The results obtained were analysed and spatially represented using the GIS tool.

After analysing the values of vulnerability index and the average damage grade, the impact of applying a strengthening intervention in buildings with potential soft-storey mechanism was studied in order to improve the structural behaviour. The results obtained after the strengthening reflect the improvement of the seismic behaviour of the structures.

The efficiency of the strengthening intervention was evaluated from the comparative point of view, based on the analysis: degrees of physical damage and economic losses. It is important to prove that actions to mitigate seismic vulnerability, namely the investment in seismic strengthening measures, translate into a positive economic balance.

ÍNDICES

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|------------|
| Índice geral..... | i |
| Índice de figuras | iii |
| Índice de tabelas | vii |
| Lista de símbolos..... | ix |
| 1. Introdução | 3 |
| 1.1. Enquadramento e motivação | 3 |
| 1.2. Objetivos da dissertação | 3 |
| 1.3. Estrutura da dissertação | 4 |
| 2. Vulnerabilidade sísmica de estruturas de betão armado..... | 9 |
| 2.1. Introdução..... | 9 |
| 2.2. Metodologias de avaliação da vulnerabilidade..... | 10 |
| 2.2.1. Metodologia baseada na vulnerabilidade observada | 10 |
| 2.2.2. Metodologias de análise baseadas em modelos simplificados | 14 |
| 2.2.3. Metodologia de análise detalhada..... | 18 |
| 2.3. Comentários Finais | 19 |
| 3. Metodologia de avaliação simplificada adotada | 23 |
| 3.1. Metodologia de avaliação simplificada adotada..... | 23 |
| 3.1.1. Descrição geral dos parâmetros..... | 24 |
| 3.1.2. Grau de confiança – Classificação EMBA | 38 |
| 3.2. Grau de dano em edifícios de betão armado..... | 39 |
| 3.3. Implementação da ferramenta SIG | 40 |
| 3.4. Comentários finais..... | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Caso de estudo – O centro urbano da cidade de Faro | 45 |
| 4.1. Breve enquadramento histórico..... | 45 |
| 4.2. Evolução da malha urbana e dinâmica construtiva | 45 |
| 4.3. Bairro Ribeirinho..... | 47 |
| 4.4. Bairro da Mouraria | 50 |
| 4.5. Comentários Finais..... | 53 |
| 5. Avaliação da vulnerabilidade sísmica dos casos de estudo..... | 53 |
| 5.1. Classificação dos parâmetros | 53 |
| 5.2. Influência dos parâmetros no Índice de Vulnerabilidade, I_v | 58 |
| 5.3. Grau de confiança - EMBA..... | 59 |
| 5.4. Índices de vulnerabilidade..... | 60 |
| 5.5. Estimativa de dano | 62 |
| 5.6. Comentários Finais..... | 66 |
| 6. Avaliação da implementação de uma ação de reforço sísmico..... | 69 |
| 6.1. Reavaliação do Índice de Vulnerabilidade - parâmetro P6 | 69 |
| 6.1.1. Reavaliação da estimativa de dano..... | 71 |
| 6.2. Construção de curvas de fragilidade | 75 |
| 6.3. Perdas económicas e estimativa de custos de reparação | 76 |
| 6.4. Comentários Finais..... | 79 |
| 7. Conclusões e trabalhos futuros | 83 |
| 7.1. Principais Conclusões | 83 |
| 7.2. Perspetiva de trabalhos futuros | 84 |
| Referências bibliográficas..... | 87 |
| Anexo | 95 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Posição dos edifícios no agregado (BE - Banda Extremo, BM - Banda Meio, E - Enclausurado, G – Gaveto, I – Isolado). Fonte: (Vicente, 2008). | 26 |
| Figura 2 - Interação entre edifícios adjacentes com a respetiva classe de vulnerabilidade. Fonte: Ferreira (2015). | 26 |
| Figura 3 – Explicação dos limites do desnível dos pisos dos edifícios. Fonte: Yakut et al.(2012). | 27 |
| Figura 4 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo a) e b). Fonte: (CEN, 2004). | 32 |
| Figura 5 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo c). Fonte: (CEN, 2004). | 33 |
| Figura 6 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo d). Fonte:(CEN, 2004). | 34 |
| Figura 7 - Representação dos edifícios do caso de estudo com auxílio do software QGIS. 40 | |
| Figura 8 - Localização dos 3 núcleos edificados: Vila Adentro (zona A), Bairro da Mouraria (zona B) e Bairro Ribeirinho (zona C) (Fonte: Maio et al., 2015b). | 46 |
| Figura 9 - Morfologia urbano do caso de estudo constituído pelo Bairro Ribeirinho (C) e pelo Bairro da Mouraria (B) (fonte: Google Street View, 2016). | 46 |
| Figura 10 - Vista área do Bairro Ribeirinho (fonte: Google Street View, 2016). | 47 |
| Figura 11 - Planta atual da malha urbana do Bairro Ribeirinho. | 48 |
| Figura 12 - a) Rua S. Pedro. b) Rua Conselheiro Bívar. | 48 |
| Figura 13 - Identificação dos edifícios em betão armado do Bairro Ribeirinho. | 49 |
| Figura 14 - Vista área do Bairro da Mouraria (fonte: Google Street View, 2016). | 50 |
| Figura 15 - Planta atual da malha urbana do Bairro da Mouraria. | 50 |
| Figura 16 -a) Rua 1º de Dezembro. b) Rua Primeiro de Maio. | 51 |
| Figura 17 - Época construção Bairro Mouraria (ARU, 2011). | 52 |
| Figura 18 - Identificação dos edifícios em betão armado do Bairro Mouraria. | 53 |
| Figura 19 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P1 para o cálculo do I_v | 53 |
| Figura 20 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P2 para o cálculo do I_v | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P3 para o cálculo do I_v | 55 |
| Figura 22 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P4 para o cálculo do I_v | 55 |
| Figura 23 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P5 para o cálculo do I_v | 56 |
| Figura 24 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P6 para o cálculo do I_v | 57 |
| Figura 25 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P7 para o cálculo do I_v | 57 |
| Figura 26 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P8 para o cálculo do I_v | 58 |
| Figura 27 - Influência de cada parâmetro no cálculo do Índice de Vulnerabilidade, I_v | 59 |
| Figura 28 - Distribuição do grau de confiança dos parâmetros (P1 a P8)..... | 60 |
| Figura 29 - Distribuição dos edifícios analisados pelos intervalos de valores dos índices de vulnerabilidade. | 61 |
| Figura 30 - Distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade. | 62 |
| Figura 31 - Curvas de vulnerabilidade. | 63 |
| Figura 32 - Distribuição do grau de dano para diferentes intensidades sísmicas..... | 63 |
| Figura 33 - Cenário de dano para I (EMS-98) = VII..... | 64 |
| Figura 34 - Cenário de dano para I (EMS-98) = VIII. | 64 |
| Figura 35 - Cenário de dano para I (EMS-98) =IX. | 65 |
| Figura 36 - Cenário de dano para I (EMS-98) =X. | 65 |
| Figura 37 - Comparação dos índices de vulnerabilidade de pré e pós-esforço..... | 70 |
| Figura 38 - Distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade a) pré-reforço e b) pós-reforço. | 71 |
| Figura 39 - a) Curvas de vulnerabilidade pré-reforço. b) Curvas de vulnerabilidade pós-reforço. | 72 |
| Figura 40 - Distribuição do grau de dano pelas diferentes intensidades macrossísmicas (PRÉ-R: pré-reforço e PÓS-R: pós-reforço). | 73 |
| Figura 41 - Cenário de dano para I (EMS-98) =VII, a) pré-reforço e b) pós-reforço..... | 73 |
| Figura 42 - Cenário de dano para I (EMS-98) =VIII, a) pré-reforço e b) pós-reforço..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 43 - Cenário de dano para I (EMS-98) =IX, a) pré-reforço e b) pós-reforço..... | 74 |
| Figura 44 - Cenário de dano para I (EMS-98) =X, a) pré-reforço e b) pós-reforço..... | 74 |
| Figura 45 – Comparação das curvas de fragilidade para $I_v=29.36$ e $I_v=19.18$ | 75 |
| Figura 46 - Relação entre os Índices de Vulnerabilidade e o custo relativo. | 77 |
| Figura 47 - Estimativa de custo de reparação..... | 78 |
| Figura 48 - Balanço económico..... | 79 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Formato da matriz probabilidade de dano (Whitman, Reed, & Hong, 1974). ... | 11 |
| Tabela 2 - Definição das classes de vulnerabilidade das construções segundo a escala MSK (Medvedev & Sponheuer, 1969). | 12 |
| Tabela 3 - Classificação do dano dos edifícios (Medvedev & Sponheuer, 1969)..... | 12 |
| Tabela 4 - Definição de quantidade de dano que os edifícios estão sujeitos à ação sísmica (Medvedev & Sponheuer, 1969). | 12 |
| Tabela 5 - Relação entre o tipo de estruturas com a escala de intensidade para obter uma possível classificação do dano dos edifícios segundo (Medvedev & Sponheuer, 1969). ... | 13 |
| Tabela 6 - Definição das classes de vulnerabilidade segundo o EMS-98 [adaptado de Grünthal, 1998]. Fonte: (Vicente,2008). | 14 |
| Tabela 7 - Índice de vulnerabilidade (I_v^*), parâmetros que o definem e respectivos pesos associados (Silva, 2015). | 23 |
| Tabela 8 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P1..... | 25 |
| Tabela 9 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P2..... | 27 |
| Tabela 10 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P3..... | 29 |
| Tabela 11- Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P4..... | 31 |
| Tabela 12 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo a) e b). | 34 |
| Tabela 13 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo c). | 35 |
| Tabela 14 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo d). | 35 |
| Tabela 15 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P6..... | 36 |
| Tabela 16 - Definição das classes de vulnerabilidade para parâmetro P7..... | 37 |
| Tabela 17 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P8..... | 37 |
| Tabela 18 - Definição geral dos quatro níveis do grau de confiança. (Fonte: Vicente,2008). | 38 |
| Tabela 19 - Classificação dos graus de danos de edifícios em betão armado. Fonte: (Grünthal, 1998)..... | 39 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|--|
| ATC | <i>Applied Technology Council</i> |
| ARU | Área de Reabilitação Urbana |
| CEN | Comité Europeu de Normalização |
| D_K | Grau de dano k |
| EC8 | Eurocódigo 8 |
| EMS-98 | <i>European Macroseismic Intensity Scale</i> |
| FEMA | <i>Federal Management Agency</i> |
| INE | Instituto Nacional e Estatística |
| I_v | Índice de vulnerabilidade sísmica de edifícios normalizado |
| I_v^* | Índice de vulnerabilidade sísmica de edifícios |
| $I_{v,médio}$ | Índice de Vulnerabilidade médio |
| MPD | Matriz de Probabilidade de dano |
| MSK | <i>Medvedev-Sponheuer-Karnik Macros Seismic Intensity Scale</i> |
| p_i | Peso de cada parâmetro |
| REBAP | Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçados |
| RSA | Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica |
| μ_D | Grau de dano médio estimado |
| $\mu_{Dint.}$ | Grau de dano médio estimado pós-reforço |
| σ_{I_v} | Desvio de padrão do índice de vulnerabilidade médio |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

Os sismos são dos fenómenos naturais que, quando se fazem sentir, podem originar consequências devastadoras. Assim, é fundamental refletir sobre o papel da segurança sísmica no planeamento das cidades, e principalmente dos centros históricos, onde, habitualmente, o valor histórico e arquitetónico é mais importante e onde se concentram os edifícios com maior vulnerabilidade às ações dinâmicas deste fenómeno (Ferreira, 2009).

O impacto e as consequências dos sismos em áreas urbanas são difíceis de estimar devido a diversos fatores, tais como a concentração populacional, densidade de construção e as atividades económicas como a indústria, comércio e o turismo (Silva, 2015).

O tema da gestão do risco sísmico nos centros urbanos e mitigação da vulnerabilidade do edificado existente tem vindo a ganhar relevância um pouco por todo o mundo, sendo atualmente uma preocupação transversal das entidades públicas até aos proprietários (Maio *et al.*, 2015a). Portugal está associado a uma perigosidade sísmica moderada a elevada, sendo o risco sísmico uma ameaça real. Ao longo dos séculos, Lisboa, as ilhas dos Açores e a região do Algarve foram as zonas do país mais afetadas por sismos

1.2. Objetivos da dissertação

A presente dissertação aborda o tema da avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios em betão armado. Assim, o objetivo principal da dissertação é apresentar contributos para avaliar a vulnerabilidade sísmica de estruturas em betão armado através da aplicação de uma metodologia simplificada ao edificado de uma zona urbana, tendo sido escolhido como caso de estudo dois bairros localizados na cidade de Faro.

Após o estudo e análise da vulnerabilidade sísmica dos edifícios analisados, obtiveram-se mapas de vulnerabilidade sísmica com recurso ao *software* de Informação Geográfica *open source*, QGIS (Open Source Geospatial Foundation, 2007).

De seguida, foi avaliada o efeito de uma intervenção de reforço sísmico de alguns edifícios, de forma a estudar o efeito nos resultados globais, percebendo assim a influência que a operação de reforço para prevenir o fenómeno de *soft-storey* poderá ter na redução do índice de vulnerabilidade e consequentemente no nível de dano físico. Esta análise termina com um balanço económico, de modo a perceber qual o investimento necessário que resultará sempre na redução de perdas humanas e económicas no futuro.

Resumidamente, procura-se compreender, através da aplicação de uma metodologia simplificada, a vulnerabilidade do edificado em betão armado e mapear espacialmente esses resultados, servindo este estudo como suporte técnico e apoio à definição de cenários de intervenção, para as entidades competentes e com poder de decisão em operações urbanísticas e sobre o edificado.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos. No capítulo 1 faz-se um enquadramento geral do tema e descrevem-se os objetivos a atingir com o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 2 é feita uma abordagem teórica das várias metodologias para avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios em betão armado. Assim, apresentam-se três tipos de metodologias: as metodologias baseadas na vulnerabilidade observada, as metodologias de análise baseadas em modelos simplificados e as metodologias de análise detalhada.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia adotada no presente trabalho e apresenta-se a classificação EMBA. Por fim, descreve-se a formulação utilizada para estimar graus de dano médio.

No capítulo 4 é apresentado a área urbana em estudo, que é constituída pelos bairros Ribeirinho e Mouraria na cidade de Faro.

No capítulo 5 é realizada a análise da vulnerabilidade dos edifícios estudados, apresentando-se o mapeamento dos índices de vulnerabilidade e do grau de dano através da ferramenta SIG.

No capítulo 6, apresenta-se, numa lógica comparativa, o efeito de uma ação de reforço realizada em alguns edifícios, gerando-se novos valores para o índice de vulnerabilidade e

grau de dano, construindo-se novos mapas de vulnerabilidade sísmica. Por fim, representam-se as curvas de fragilidade de pré e pós-reforço e faz-se um balanço económico.

No último capítulo, resumem-se as considerações finais e apresentam-se propostas para possíveis desenvolvimentos futuros deste trabalho.

Capítulo 2

**VULNERABILIDADE SÍSMICA EM EDIFÍCIOS DE
BETÃO ARMADO**

2. VULNERABILIDADE SÍSMICA DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

2.1. Introdução

Existe atualmente um grande interesse da comunidade científica no estudo da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado. Durante o século XX, assistiu-se a uma grande evolução do betão armado enquanto material estrutural, tendo sido amplamente estudado com o objetivo de melhorar as suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, para utilização no dimensionamento de novas estruturas (Ferreira, 2010).

Segundo os Censos (2011) o betão armado é utilizado em todo o país. A partir dos anos 60 a construção de estruturas em betão armado cresceu de forma significativa até aos dias de hoje, assim começou a ser o material estrutural mais utilizado em Portugal. Através da informação disponibilizada pelo INE (Instituto Nacional de Estatística) constata-se que ao longo dos anos os edifícios a necessitar de intervenções têm vindo a diminuir, o que poderá significar que cada vez mais há uma certa sensibilidade para a reabilitação dos edifícios. No entanto, a percentagem de edifícios a necessitar de intervenção é de 27.9% (valor no ano de 2013).

A região do Algarve, não é exceção, sendo que só a partir década de 70 é que se assistiu a um crescimento significativo na construção de edifícios em betão armado. De 2006 a 2011 houve um decréscimo da construção de edifícios provocada pela crise económica que afetou Portugal. No entanto, ao longo dos anos houve uma diminuição do número de edifícios com necessidade de reparação, sendo que ainda há um grande trabalho a ser realizado nos edifícios de todo país (Censos, 2011).

Portugal é um país com uma perigosidade sísmica moderada a elevada, dependendo da região do país considerada. Neste sentido, existe uma enorme e urgente necessidade de fazer uma avaliação em larga escala da vulnerabilidade sísmica do edificado existente, particularmente, daquele dimensionado e construído sem atender aos efeitos da ação sísmica.

2.2. Metodologias de avaliação da vulnerabilidade

A vulnerabilidade sísmica define-se como propriedade intrínseca das estruturas, sendo uma característica do seu próprio comportamento sujeita à ação sísmica, descrita através de uma lei causa-efeito em que a causa é a ação sísmica e o efeito o dano estrutural (Sandi & Floricel, 1995).

Os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica de estruturas têm como finalidade traduzir a resposta sísmica das construções, medida em termos de dano, com base na relação entre uma determinada ação sísmica e as suas características intrínsecas. De seguida, são apresentadas algumas das metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios existentes, subdivididas em três grupos distintos: metodologias de vulnerabilidade observadas, metodologias de avaliação baseadas em modelos simplificados e metodologias de análise detalha (Ferreira, 2010).

A escolha da metodologia deverá ter em conta o objetivo da avaliação, os meios tecnológicos envolvidos, o tempo e o custo associado, a qualidade e disponibilidade da informação existente, e a escala de avaliação.

2.2.1. Metodologia baseada na vulnerabilidade observada

Na tentativa de avaliar a vulnerabilidade sísmica a larga escala, a *Federal Management Agency* (FEMA, 1979), responsável pela resposta a desastres nos Estados Unidos da América, criou, em 1985, a *Applied Technology Council* (ATC). De entre estes, um dos que teve maior destaque foi o ATC-13, que tinha como objetivo avaliar danos e perdas após o sismo de 1985 na Califórnia (Rojahn e Sharpe, 1985; Ferreira, 2010).

Deste ATC-13 resultou uma Matriz de Probabilidade de Dano (MPD), para 78 estruturas diferentes, das quais 40 eram edifícios. A particularidade deste método é que as MPD, relativas a diferentes tipologias estruturais e intensidades sísmicas, foram definidas através da opinião de 78 especialistas, cada um deles fornecendo uma estimativa do grau de dano mais provável numa determinada tipologia estrutural, para uma determinada intensidade sísmica, como apresentada na Tabela 1. A maior limitação desta metodologia prende-se com a óbvia subjetividade associada à forma como são construídas as MPD, facto que leva a que os resultados obtidos não possam ser considerados inteiramente fiáveis. No entanto, esta

metodologia foi uma das ferramentas mais utilizadas durante os anos 80 (Speranza, 2003; Ferreira, 2009).

Tabela 1 - Formato da matriz probabilidade de dano (Whitman, Reed, & Hong, 1974).

| Estado de dano | Dano estrutural | Dano não estrutural | Rácio de dano (%) | Intensidade sísmica | | | | |
|----------------|-----------------|---------------------|-------------------|---------------------|------|------|------|------|
| | | | | V | VI | VII | VIII | IX |
| 0 | Nenhum | Nenhum | 0-0.05 | V | VI | VII | VIII | IX |
| 1 | Nenhum | Ligeiro | 0.05-0.30 | 10.4 | - | - | - | - |
| 2 | Nenhum | Localizado | 0.30-1.25 | 16.4 | 0.5 | - | - | - |
| 3 | Não assinalável | Distribuído | 1.25-3.50 | 40.0 | 22.5 | - | - | - |
| 4 | Ligeiro | Substancial | 3.50-4.50 | 20.0 | 30.0 | 2.7 | - | - |
| 5 | Substancial | Extensivo | 7.50-20.0 | 13.2 | 47.1 | 92.3 | 58.8 | 14.7 |
| 6 | Elevado | Quase total | 20.0-65.0 | - | 0.2 | 5.0 | 41.2 | 83.0 |
| 7 | Pré-ruína | | 100 | - | - | - | - | 2.3 |
| 8 | Colapso | | 100 | - | - | - | - | - |

Este tipo de matriz de probabilidade de dano tornou-se a mais utilizada para definir a probabilidade de distribuição dos danos, sendo adotado por outros métodos (Ferreira, 2010). Assim sendo, foram elaboradas outras duas metodologias semelhantes, que pretendem melhorar e acelerar as inspeções de dano pós-sismo, formuladas através de escalas macrossísmicas: a *Medvedev-Sponheuer-Karnik Macroseismic Intensity Scale* (MSK) (Medvedev & Sponheuer, 1969) e a *European Macroseismic Scale* (EMS) (Grünthal, 1998). A escala macrossísmica MSK define três classes de vulnerabilidade decrescente A, B e C, tendo em conta as características dos edifícios (ver Tabela 2). Nesse trabalho, os autores criaram uma correspondência (ver Tabela 3) onde relacionam a escala de intensidade com a classificação de dano para os edifícios (ver Tabela 4) e ainda com a quantidade de edifícios que poderão vir a ser afetado (ver Tabela 5) (Silva, 2015).

Tabela 2 - Definição das classes de vulnerabilidade das construções segundo a escala MSK (Medvedev & Sponheuer, 1969).

| Classe | Descrição |
|---------------|---|
| A | Construção em pedra natural (não aparelhada) e blocos de terra crua (adobe). Amplamente utilizado em edifícios de habitação e que são mais sujeitos a maiores danos. |
| B | Construção com blocos comuns e blocos de pedra aparelhada ou artificial. Utilizado em edifícios de habitação com um comportamento sísmico melhorado devido à utilização de melhores materiais na constituição das alvenarias. |
| C | Construção em estrutura de betão armado. |

Tabela 3 - Classificação do dano dos edifícios (Medvedev & Sponheuer, 1969).

| Escala de dano | Tipo de dano |
|-----------------------|--|
| 1 | Dano leve – Presença de pequenas fissuras. |
| 2 | Dano moderado – Presença de fendas em paredes divisórias, queda de estuques. |
| 3 | Dano severo – Grandes fissuras em paredes divisórias, queda de chaminés. |
| 4 | Dano muito grave – Grandes aberturas nos elementos estruturais. |
| 5 | Colapso – Colapso total dos edifícios. |

Tabela 4 - Definição de quantidade de dano que os edifícios estão sujeitos à ação sísmica (Medvedev & Sponheuer, 1969).

| Definição | Quantidade |
|------------------|-------------------|
| Poucos | Cerca de 5% |
| Muitos | Cerca de 50% |
| Bastantes | Cerca de 75% |

Tabela 5 - Relação entre o tipo de estruturas com a escala de intensidade para obter uma possível classificação do dano dos edifícios segundo (Medvedev & Sponheuer, 1969).

| Escala de intensidade | Tipo de estruturas | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | A | B | C |
| V | Poucos – 1 | - | - |
| VI | Poucos – 2 Muitos – 1 | Poucos – 1 | - |
| VII | Poucos – 4 Muitos – 3 | Muitos – 2 | Muitos – 1 |
| VIII | Poucos – 5 Muitos – 4 | Poucos – 4 Muitos – 3 | Poucos – 3 Muitos – 2 |
| IX | Muitos – 5 | Poucos – 5 Muitos – 4 | Poucos – 4 Muitos – 3 |
| X | Bastantes – 5 | Muitos – 5 | Poucos – 5 Muitos – 4 |

A Escala Macrossísmica Europeia, EMS-98 foi criada com o objetivo de melhorar a escala de intensidade MSK, passando assim a classificar as estruturas em seis classes de vulnerabilidade de A (maior vulnerabilidade) a F (menor vulnerabilidade), tal como se pode observar na Tabela 6. Por estar definida numa escala macrossísmica, esta proposta permite relacionar, de forma indireta, a classe de vulnerabilidade do edifício com graus de danos espectáveis para diferentes intensidades (Vicente, 2008; Silva, 2015).

Apesar do grau de incerteza associado às classes de vulnerabilidade, em Itália, o principal método de avaliação de vulnerabilidade sísmica, desenvolvido em 1991 pelo *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti* (GNDT), assenta em dois níveis de seleção - nível 1 e 2 (GNDT-SSN, 1994). O nível 1 tem como objetivo a recolha de informação geográfica, geométrica e tipológica do edifício, sendo aplicada a qualquer tipo de estrutura. Em 1980, após o sismo de Irpinia (Itália), esta metodologia foi aplicada, baseando-se nas classificações preliminares dos edifícios, de acordo com uma escala predefinida de 13 tipologias construtivas. Devido à vasta quantidade de informação, foi possível desenvolver diagramas com valores de dano provável (D'Ayala & Speranza, 2002; Ferreira, 2009; Silva, 2015).

Importa notar que a vastidão de classes de edifícios consideradas e a forma pouco rigorosa como cada classe é definida, podem resultar em incertezas e imprecisões com impacto negativo na correção das curvas de vulnerabilidade obtidas (Ferreira, 2010).

Tabela 6 - Definição das classes de vulnerabilidade segundo o EMS-98 [adaptado de Grünthal, 1998]. Fonte: (Vicente,2008).

| TIPO DE ESTRUTURA | | Classe de Vulnerabilidade | | | | | |
|-------------------|--|---------------------------|-------------|-------------|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F |
| ALVENARIA | Alvenaria de pedra irregular e solta | ○ | | | | | |
| | Adobe | ○----- | | | | | |
| | Alvenaria de pedra (aparelhada) | -----○ | | | | | |
| | Alvenaria de pedra aparelhada (silhares) | | -----○----- | | | | |
| | Alvenaria de blocos de betão ou tijolo (não reforçada) | -----○----- | | | | | |
| | Alvenaria com pavimentos de betão armado | | -----○----- | | | | |
| | Alvenaria reforçada/Alvenaria confinada | | | -----○----- | | | |
| BETÃO ARMADO | Estrutura porticada em betão armado sem CSR ou com CSR mínimo ¹ | -----○----- | | | | | |
| | Estrutura porticada em betão armado com CSR moderado | | -----○----- | | | | |
| | Estrutura porticada em betão armado com CSR elevado | | | -----○----- | | | |
| | Estrutura de paredes em betão sem CSR ou com CSR mínimo | -----○----- | | | | | |
| | Estrutura de paredes em betão armado com CSR moderado | | -----○----- | | | | |
| | Estrutura de paredes em betão armado com CSR elevado | | | -----○----- | | | |
| METÁLICA | Estrutura metálica | | | -----○----- | | | |
| MADEIRA | Estrutura de madeira | | -----○----- | | | | |

¹CSR - Conceção sísmo-resistente
○ Classe mais provável |-----| margem para classe menos provável |-----| margem da classe provável

2.2.2. Metodologias de análise baseadas em modelos simplificados

As curvas de vulnerabilidade baseadas na observação e na opinião de especialistas são impossíveis de serem formuladas devido à impossibilidade de observação e inspeção pós-sismo. Assim sendo, é necessário recorrer a outros métodos para avaliar a vulnerabilidade de um grande grupo de edifícios, num curto espaço de tempo. Para isso, surgiram as metodologias baseadas em modelos analíticos simplificados onde a avaliação da vulnerabilidade sísmica do edifício é feita a partir do conhecimento de alguns parâmetros de ordem geométrica ou mecânica. Normalmente, quanto mais simples o método, menor será o tempo consumido e menor será o rigor da elaboração dos cenários de dano e de risco sísmicos. No entanto, os resultados devem permanecer fidedignos, logo os poucos parâmetros necessários deverão ser obtidos com qualidade, garantindo uma adequada

capacidade de avaliação do comportamento perante a ação sísmica dos edifícios (Ferreira, 2010; Silva, 2015). Nas últimas décadas foram desenvolvidas várias metodologias simplificadas com procedimentos de carácter simples e rápido, destacando-se a proposta “*Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards*” (RVS) desenvolvida pela ATC 21 (1988), a metodologia proposta por Hirosawa (1993), a metodologia GNDT II (1994), a proposta de Bal (2005) “*P25 Scoring method*”, a proposta de Yakut (2007), e a proposta de Rai (2008) (Silva, 2015).

A metodologia “*Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards*” (RVS) sugere que se realize a inspeção ao edifício, envolvendo uma identificação do sistema estrutural resistente às ações laterais e o reconhecimento das características do edifício que alteram a resposta sísmica esperada para esse sistema. O procedimento do cálculo estrutural consiste numa matriz de valores (*Basic Structural Hazard Scores*), que varia consoante o tipo de sistema estrutural, a resistência às ações laterais dos edifícios em estudo e dos seus materiais. O valor final (*Final Structural Score*) é obtido através da adição ou subtração de fatores modificadores de desempenho (*Score Modifiers*), caso sejam detetadas certas características das construções que alteram o comportamento sísmico espectável do sistema estrutural. Todos os valores da matriz estão relacionados com a probabilidade de colapso do edifício. Os valores finais situam-se, habitualmente, entre 0 e 7, sendo que um valor mais elevado corresponde a um melhor desempenho sísmico (ATC-21, 2002; C. Ferreira, 2008; Silva, 2015).

A proposta desenvolvida por Hirosawa (1993) é composta por três níveis de avaliação, existindo, no entanto, um conceito básico que é comum aos três. Esta metodologia pode ser aplicada em edifícios de betão armado antes e após a ocorrência de um sismo, avaliando diferentes parâmetros, nomeadamente, o número de pisos, a rigidez e a ductilidade dos elementos estruturais, a área da secção transversal de elementos estruturais e não estruturais, entre outros. A vulnerabilidade sísmica é determinada para cada um dos pisos do edifício e para ambas as direções longitudinais e transversais. Este valor depende de vários parâmetros, tais como, a configuração estrutural do edifício, a deterioração causada pela idade do edifício e um sub-índice sísmico da estrutura, que depende da resistência e ductilidade. No primeiro nível, o desempenho sísmico é quantificado de forma simplificada através do cálculo do índice sísmico básico, sendo este determinado através do somatório do produto das secções

transversais dos vários elementos estruturais com base nas suas tensões médias resistentes. Se o índice de desempenho sísmico for superior ao índice associado à estrutura, conclui-se que o edifício responde com segurança a este tipo de solicitação. Caso contrário, não verifica a segurança, sendo necessário nova verificação com recurso a um segundo nível de avaliação. Nestes casos, o desempenho sísmico, a resistência e a ductilidade dos elementos verticais são determinados através da resistência máxima para cada modo de rotura, utilizando-se o valor mais desfavorável, considerando-se as lajes e as vigas indeformáveis. Se o índice de desempenho sísmico for superior ao índice associado à estrutura, o edifício encontra-se em segurança. Caso contrário, passa-se para o nível seguinte. No terceiro e último nível, a determinação do desempenho sísmico e do índice dos elementos não estruturais torna-se mais complexo. Caso o índice de desempenho sísmico seja superior ao índice associado à estrutura, assume-se que o edifício se encontra em segurança. Caso seja inclusivo, realiza-se uma análise dinâmica ou outra investigação (Hirosawa, Sugano, & Kaminosono, 1993; L. Rodrigues, 2009; Silva, 2009).

A GNDT-SSN (1994) baseia-se num vasto estudo e levantamento de danos pós-sismo em edifícios de alvenaria, dando importância a outros parâmetros, que controlam a construção de danos, sendo investigados individualmente. Esta metodologia tem como objetivo o cálculo do índice de vulnerabilidade, I_v (Equação 2.1) a partir da soma ponderada de 14 parâmetros (P_i) que são classificados em classes de vulnerabilidade (C_{vi}) crescente, de A a D, que condicionam a vulnerabilidade sísmica do edifício.

$$I_v = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times P_i \quad (2.1)$$

Os parâmetros, P_i , da proposta são os seguintes: P1: Tipo de sistema estrutural; P2: Qualidade do sistema estrutural; P3: Resistência convencional; P4: Localização e condições do solo; P5: Diafragmas horizontais; P6: Configuração em planta; P7: Configuração em altura; P8: Distância máxima entre paredes; P9: Tipo de cobertura; P10: Elementos não estruturais; e P11: Estado de conservação (GNDT-SSN, 1994; Silva, 2015).

A proposta “*P25 Scoring Method*”(Ball, 2015) trata-se de uma metodologia de avaliação expedita, que foi desenvolvida e testada inicialmente em 26 casos diferentes, a fim de se prever a vulnerabilidade sísmica de edifícios em betão armado, através da análise de vários parâmetros estruturais dos edifícios. Numa primeira fase, este método baseou-se na observação e análise dos parâmetros estruturais mais importantes, isto é, aqueles que afetam diretamente a resposta e o desempenho sísmico do edifício, sendo avaliadas diferentes características estruturais, nomeadamente: a dimensão em planta; a altura do pé direito; a altura total do edifício; a configuração em planta do rés-do-chão; as dimensões dos elementos estruturais; a aceleração efetiva do solo; o fator da importância do edifício; as condições do solo de fundação; a qualidade dos materiais; as zonas de confinamento dos pilares; as irregularidades estruturais, como é o caso dos pilares curtos; a torção; as descontinuidades estruturais; e o choque entre edifícios adjacentes (Bal, Tezcan, & Gulay, 2006; L. Rodrigues, 2009; Silva, 2015).

A metodologia proposta por Sucuoglu e Yazgan (1999) é constituída por dois níveis de avaliação da vulnerabilidade sísmica. Os seus parâmetros podem ser analisados em edifícios de betão armado com altura inferior a 8 pisos, através da observação. No primeiro nível de avaliação é feita uma observação visual do edifício onde são registados vários parâmetros, nomeadamente, o número de pisos acima do solo, a existência ou não *soft-storey*, a existência de pisos exteriores suspensos, a qualidade aparente do betão, a existência de mecanismos do tipo pilar-curto, a possibilidade de existência de efeitos de *pounding* entre edifícios adjacentes, as condições do solo e o efeito topográfico do edifício. O segundo nível de avaliação é realizado na sequência do primeiro, e compreende a análise de um conjunto parâmetros tais como a irregularidade em planta, o índice de resistência das forças laterais e a redundância estrutural. De modo a finalizar a avaliação da vulnerabilidade do edifício, as acelerações sísmicas no solo servem como *basic score* para o cálculo do valor do desempenho sísmico, dependendo da zona sísmica onde se encontra. Através da iteração entre os diferentes parâmetros obtém-se então um indicador do desempenho sísmico do edifício (Sucuoglu & Yazgan, 1999; L. Rodrigues, 2009; Silva, 2015).

Mais recentemente, Yakut, Erberik, Akkar, & Sucuoglu (2012) propuseram uma atualização ao método Sucoglu e Yazgan (2003), acrescentando novos parâmetros de avaliação e realizando um tratamento de risco sísmico diferente. Nesta metodologia, para além dos

parâmetros de avaliação mencionados na anterior proposta, o *basic score* contém diferentes estruturas dos edifícios de betão armado, servindo como modificador do valor do desempenho sísmico do edifício (Silva, 2015).

O método proposto por Rai (2008) é baseado numa abordagem que está de acordo com a prática Indiana, derivando de metodologias como *ATC 40*, *FEMA 310*, *FEMA 273* (atual *FEMA 356*), *UCBC* (atual *GSREB*) de *ICBO*, *ASCE31-03*, Eurocódigo 8 e a nova norma Neozelandesa. Esta metodologia avalia a capacidade de um determinado edifício, obtendo-se níveis de desempenho adequados. Esta proposta defende que o processo pode ser dividido em dois passos (Rai, 2008; L. Rodrigues, 2009; Silva, 2015):

- Avaliação preliminar – avaliação global da vulnerabilidade sísmica, isto é, verificações relacionadas com a resistência e com a configuração. Se os critérios forem cumpridos não é necessário reforço;
- Avaliação detalhada – avaliação efetuada quando os resultados não são satisfatórios na avaliação preliminar, isto é, verificação geral para uma resistência a forças laterais e avaliação complementar ao edifício. Se os critérios forem cumpridos não será necessário reforço.

2.2.3. Metodologia de análise detalhada

As metodologias de análise detalhada são aplicadas a edifícios que apresentam uma rigorosa informação da geometria dos seus elementos, da tecnologia construtiva e das propriedades mecânicas dos seus materiais. Estas propostas recorrem normalmente a modelos numéricos pormenorizados, avaliando edifícios singulares ou edifícios representativos de uma determinada tipologia estrutural. Os procedimentos podem ser divididos em quatro tipos de análise distintas (Ferreira, 2009; Lang, 2002; Silva, 2009):

Análises estáticas lineares – utilizadas para o dimensionamento e conceção estrutural, encontrando-se consideradas na maioria dos códigos de dimensionamento e verificação da segurança sísmica. A limitação destas análises reside no facto de serem adequada apenas para o estudo de edifícios regulares;

Análises estáticas não-lineares – a grande vantagem deste tipo de análise é a maior aproximação em termos de esforços e deformações provocadas pela ação sísmica, devido à

contabilização dos efeitos da não linearidade do comportamento material. No entanto, estes métodos só são válidos para edifícios regulares, onde o primeiro modo de vibração é preponderante na resposta da estrutura;

Análises dinâmicas não-lineares – a ação sísmica é modelada por histogramas temporais de movimento e a resposta da estrutura é determinada com base em procedimentos de integração passo a passo. Este é o procedimento mais completo no cálculo de forças internas e deslocamentos de estruturas sujeitas à ação sísmica.

2.3. Comentários Finais

Ao longo do presente capítulo apresentou-se de forma sucinta os vários estudos realizados acerca da avaliação da vulnerabilidade sísmica. Existem três grandes grupos de metodologias: as metodologias análise baseados na observação, que exigem demasiado tempo, as metodologias em modelos simplificadas que se baseiam numa análise rápida e num conjunto grande de edifícios e por último, as metodologias de análise detalhada que são aplicadas a edifícios que apresentam uma informação rigorosa e pormenorizada.

O principal objetivo da dissertação é a avaliação da vulnerabilidade sísmica de um conjunto de edifícios em betão armado localizados numa malha urbana na cidade de Faro. Assim, optou-se por uma metodologia de análise simplificada de forma a ser possível uma análise rápida e simples. No entanto, a avaliação dos parâmetros neste tipo de metodologia serão obtidos com rigor.

No capítulo seguinte descreve-se a metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica adotada.

Capítulo 3

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA
ADOTADA**

3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA ADOTADA

3.1. Metodologia de avaliação simplificada adotada

Silva (2015) sugere que a escolha da metodologia deve ter em atenção a natureza do edifício, a escala a que é aplicada e os recursos envolvidos no processo. Sendo que se pretende fazer uma avaliação da vulnerabilidade sísmica à escala urbana, os métodos simplificados serão os que mais se adequam, não descurando o rigor e a confiança dos resultados do estudo.

Na metodologia utilizada é calculado um índice de vulnerabilidade para cada edifício, através de 8 parâmetros associados ao tipo de solo, ao enquadramento urbano e ao edifício individual. Os parâmetros são classificados em 4 classes de vulnerabilidade, C_{vi} : A, B, C e D. A cada parâmetro é associado um peso, p_i , que poderá variar entre 0,5 e 2, dependendo da importância do parâmetro no cálculo do índice de vulnerabilidade (ver Tabela 7). O valor do índice de vulnerabilidade, I_v^* é obtido através da soma ponderada, expressão (3.1), variando entre 0 e 600. De forma a tornar mais fácil a sua utilização e interpretação, o valor do índice é posteriormente normalizado para variar entre 0 e 100, assumindo a designação, I_v , (Silva, 2015).

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times p_i \quad (3.1)$$

Tabela 7 - Índice de vulnerabilidade (I_v^*), parâmetros que o definem e respetivos pesos associados (Silva, 2015).

| Parâmetro | Classe C_{vi} | | | | Peso |
|---|-----------------|---|----|----|-------|
| | A | B | C | D | p_i |
| P1 Implantação do edifício | 0 | 5 | 20 | 50 | 1,5 |
| P2 Posição do quarteirão | 0 | 5 | 20 | 50 | 0,5 |
| P3 Idade do edifício | 0 | 5 | 20 | 50 | 1,5 |
| P4 Irregularidade em planta | 0 | 5 | 20 | 50 | 2,0 |
| P5 Irregularidade em altura | 0 | 5 | 20 | 50 | 2,0 |
| P6 Existência de mecanismo de <i>soft-storey</i> | 0 | - | - | 50 | 2,0 |
| P7 Presença de pilares curtos | 0 | 5 | 20 | 50 | 2,0 |
| P8 Outros elementos | 0 | 5 | 20 | 50 | 0,5 |

Em seguida, apresenta-se os 8 parâmetros de avaliação da vulnerabilidade sísmica de forma detalhada, fazendo-se a identificação dos principais aspetos a avaliar e uma breve descrição dos mesmos.

3.1.1. Descrição geral dos parâmetros

Parâmetro P1: Implantação do edifício

Para este parâmetro é importante que se conheça a localização do edifício e o tipo de solo. Neste critério é necessário perceber se as estruturas se localizam em terreno plano, em aterros ou em solo inclinado. Para além disso, o tipo de solo em que se encontram é de extrema importância, pois terá influência direta no comportamento das estruturas após ocorrência de um sismo.

Nesta metodologia, as características do terreno são de grande importância na implantação do edifício. Muitas vezes não existe uma informação detalhada do tipo de solo onde este se encontra, nestes casos, Vicente (2008) sugere que se deve fazer uma classificação com base na observação visual, adotando-se a mesma classe de vulnerabilidade para todos os edifícios da zona em estudo. Sendo difícil ser-se preciso com uma avaliação visual, deve-se recorrer aos dados geotécnicos fornecidos pelas entidades locais, pois são uma fonte fiável para classificar as condições locais do solo. Em relação à classificação do solo é baseada na proposta do EC 8 (CEN, 2004):

- Solo tipo A (melhor qualidade) - Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 metros de material mais fraco à superfície.
- Solo tipo B - Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade.
- Solo tipo C - Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros.

- Solo tipo D - Depósitos de solo não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura.
- Solo tipo E (pior qualidade) - Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial.

Neste primeiro nível de avaliação não estão tidos em conta fenómenos de liquefação, logo não são considerados os solos do tipo S1 e S2. A implantação dos edifícios deve ser feita em terrenos planos e afastados de grandes declives, evitando-se o risco de deslizamento.

Os aterros são zonas sensíveis por serem passíveis de assentamentos. Um sismo provocará uma vibração do solo, que poderá originar a sua compactação, produzindo assentamentos ou deslizamentos (Bhatt, 2007).

Neste parâmetro, a escolha da classe dependerá do tipo de solo onde o edifício está inserido e localizado, ou seja, depende se está em zona de aterro, zona plana ou num terreno inclinado.

De modo a diminuir o erro optou-se por unir o solo tipo B com o C e o solo do tipo D com o E. Na Tabela 8 são apresentadas as classes de vulnerabilidade para o parâmetro relacionado com a implantação do edifício, P1.

Tabela 8 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P1.

| Terreno de fundação | Localização do edifício | | |
|------------------------|-------------------------|--------|----------------|
| | Terreno plano | Aterro | Solo inclinado |
| Solo tipo A | A | B | C |
| Solo tipo B e C | B | C | D |
| Solo tipo D e E | C | D | D |

Parâmetro P2 – Posição no quarteirão

Neste parâmetro, de uma forma geral, analisa-se o comportamento das estruturas com os edifícios adjacentes, assim torna-se importante estudar a posição do edifício e o desnível do pavimento superior a 0.5 metros entre edifícios adjacentes.

Vicente (2008) defende que a avaliação da vulnerabilidade de um determinado edifício não poderá ser feita de forma individual, isto é, quando exposto a um sismo, a interação entre

edifícios contíguos deverá ser considerada. A resposta do edifício à ação horizontal é influenciada pela sua inserção num agregado de edifícios, podendo o confinamento e interação produzido atuar de forma benéfica ou prejudicial em determinadas situações, como nos casos dos edifícios, isolados, banda extremo, gaveto de quarteirões e nos edifícios em contacto com outros de dimensões diferentes. Na Figura 1 esquematizam-se todos os tipos de posição em que os edifícios se podem encontrar.

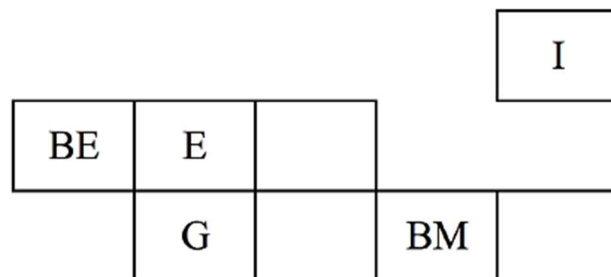


Figura 1 - Posição dos edifícios no agregado (BE - Banda Extremo, BM - Banda Meio, E - Enclausurado, G – Gaveto, I – Isolado). Fonte: (Vicente, 2008).

O *pounding*, ou choque entre edifícios, dificulta a análise sísmica das estruturas devido à complexidade em quantificar a energia transmitida durante o choque. Devido a este fenómeno, os edifícios de topo de banda ou de canto dos quarteirões, como não encontram continuidade com outro edifício, vão ter, *à priori*, pior resposta sísmica (Bhatt, 2007).

Na Figura 2, apresenta-se a localização e a classe atribuída a cada edifício.

- Classe A – edifícios adjacentes com igual altura;
- Classe B e C – edifícios adjacentes com menor altura;
- Classe D – edifício em banda extrema, sem continuidade, sendo que o edifício com o qual contacta apresenta uma altura inferior.

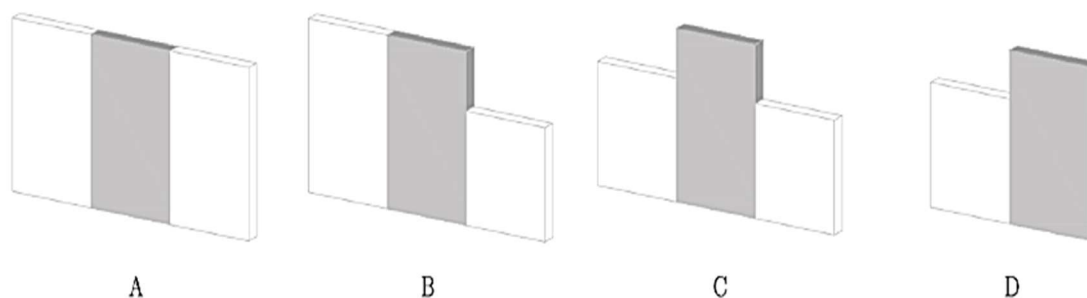


Figura 2 - Interação entre edifícios adjacentes com a respetiva classe de vulnerabilidade. Fonte: Ferreira (2015).

O desnível entre pavimentos pode provocar efeitos de grande gravidade do ponto de vista estrutural. A Figura 3 apresenta diferentes situações de desnível, a terceira situação em que a diferença de altura das lajes entre edifícios adjacentes é de pelo menos 0.5 metros, pode ser o suficiente para originar fenómenos estruturais de “*pounding*” (Vicente, 2008).

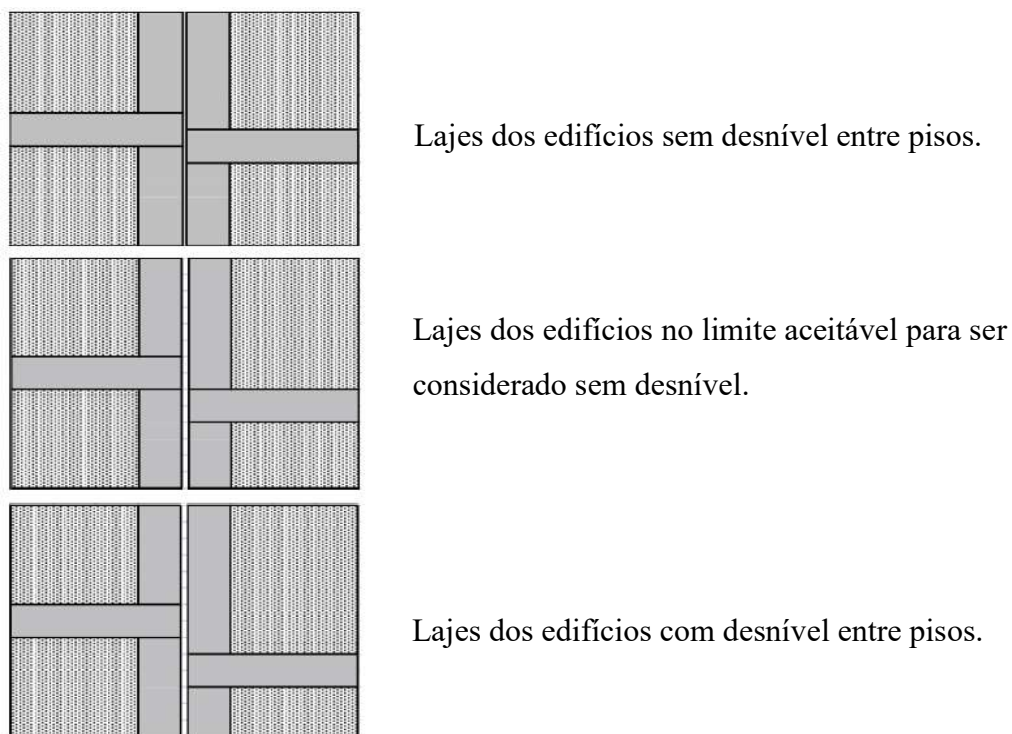


Figura 3 – Explicação dos limites do desnível dos pisos dos edifícios. Fonte: Yakut *et al.*(2012).

Na Tabela 9 apresentam-se as classes de vulnerabilidade, em que a escolha da localização do edifício é atribuída à classe inicial.

Tabela 9 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P2.

| Classe | Localização |
|--------|---------------------------|
| A | Edifício de banda meio |
| B | Edifício isolado |
| C | Edifício de gaveto |
| D | Edifício de banda extremo |

No caso de haver interação com os edifícios adjacentes, a classe de vulnerabilidade deverá sofrer penalização. Se houver uma situação como retratada na Figura 2, dever-se-á penalizar a classe consoante os critérios referidos anteriormente. Por exemplo, um edifício de banda meio é de classe A, mas se este se encontrar localizado entre dois edifícios de diferentes alturas, a sua classe de vulnerabilidade será de classe C.

Caso haja desnível dos pavimentos, só se penaliza a classe de vulnerabilidade quando a classe não sofreu alteração devido à interação dos edifícios adjacentes. Desta forma, evita-se que a classe de vulnerabilidade se agrave duas vezes. Como forma de penalização, com recurso à Figura 3, um edifício que tenha diferença de altura entre as lajes deverá ser penalizado na diminuição de um nível da sua classe de vulnerabilidade.

Parâmetro P3 – Idade do edifício

No parâmetro P3 deve-se ter em consideração o ano de construção dos edifícios, pois após análise deste critério é possível perceber se na elaboração do projeto estrutural houve uma especial atenção ao dimensionamento sísmico. Para além disso, avalia-se a qualidade da construção e se este se encontra parcialmente devoluto.

Os primeiros edifícios em betão armado construídos em Portugal foram executados de forma pouco rigorosa no que respeita à ação sísmica. A ductilidade associada às estruturas não era tida em conta, os betões utilizados tinham fraca resistência mecânica e as armaduras tinham uma normal aderência. Em 1951, surgiu o Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU), estabelecendo-se as condições necessárias à segurança sísmica nas estruturas. De modo a complementar este regulamento, em 1958, surgiu o “Regulamento da Segurança das Construções contra os Sismos”, estabelecendo, o zoneamento sísmico do território nacional em três zonas, obrigou à realização de uma verificação específica para as forças laterais e estabeleceu algumas condições qualitativas, nomeadamente, a introdução, em edifícios de pequeno porte, de elementos de confinamento, confinamento e de melhoria da ligação das paredes aos pavimentos, e a inclusão de alguns montantes de betão armado, entre outras. Nos anos 60, surgiu o RSEP (Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes), introduzindo métodos simplificados de dimensionamento sísmico, quantificando assim, os efeitos da ação sísmica. Em 1983, foi aprovado o RSA (Regulamento de Segurança e Ações),

instituindo os princípios gerais de segurança, de modo a verificar e definir as ações, entre as quais, a ação sísmica (C. Ferreira, 2008).

No início dos anos 80, a Comissão das Comunidades Europeias lançou uma série de trabalhos que visavam a elaboração de um conjunto de regras técnicas – Eurocódigos Estruturais – que permitem a harmonização do projeto estrutural de edifícios e de obras de engenharia em geral (Carvalho, 2004; Romãozinho, 2008).

O parâmetro P3 tem como objetivo identificar qual o regulamento sísmico em que cada edifício analisado está inserido, procurando avaliar desta forma a resistência sísmica. Na Tabela 10 apresenta-se as classes de vulnerabilidade do parâmetro P3.

Tabela 10 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P3.

| Classe | Intervalo de tempo da construção do edifício |
|---------------|---|
| A | Edifício construído depois de 1998 |
| B | Edifício construído entre 1983 e 1998 |
| C | Edifício construído entre 1961 e 1983 |
| D | Edifício sem dimensionamento anti sísmico |

A qualidade da construção do edifício influencia o seu comportamento sísmico. Os detalhes construtivos são fundamentais para garantir a resistência sísmica projetada para os elementos estruturais, assim sendo, deve-se garantir (Bhatt, 2007):

- Alinhamento de armadura, espaçamento bem orientado das cintas ou dos estribos e comprimentos de amarração de armaduras longitudinais;
- Boa qualidade de betão e cuidado na aplicação em obra, garantindo assim uma boa capacidade de resistência, bem como aderência necessária as armaduras;
- Boa cintagem, sobretudo nas extremidades das vigas e dos pilares, e correta amarração de todos os elementos estruturais entre si;
- Uma correta execução das paredes de alvenaria.

No caso de ser identificado algumas anomalias referidas anteriormente, dever-se-á penalizar a classe previamente atribuída na Tabela 10 de acordo com os seguintes critérios:

- Se o edifício apresentar boa qualidade, a classe previamente atribuída não sofrerá alterações;
- Se o edifício apresentar uma qualidade moderada, a classe previamente atribuída sofrerá um nível de penalização;
- Se o edifício apresentar uma fraca qualidade construtiva, a classe previamente atribuída será penalizada em dois níveis.

No caso de haver edifícios que se encontrem parcialmente devolutos, isto é, que apresentem sinais evidentes de degradação/abandono, deve-se penalizar um nível na sua classe.

Parâmetro P4 – Irregularidade em planta

Este parâmetro avalia a irregularidade em planta. Um dos critérios é a localização excêntrica da caixa de elevador, que têm influência direta no comportamento da estrutura devido à rigidez dos elementos verticais. Para além disso, de forma a analisar a esbelteza em planta das estruturas é necessário conhecer as dimensões dos edifícios. O último critério avalia se as estruturas apresentam uma configuração compacta em planta.

O parâmetro P4 avalia a forma e disposição em planta do sistema resistente do edifício. A regularidade em planta é um aspeto que condiciona o desempenho estrutural e, consequentemente, a vulnerabilidade sísmica. Esta avaliação deve ser feita recorrendo-se a relações geométricas baseadas em critérios de simetria de dimensões da envolvente em planta do edifício (Vicente, 2008). De acordo com o Eurocódigo 8, para que um edifício possa ser considerado regular em planta, deverá satisfazer as seguintes condições:

- 1) Assegurar, aproximadamente, a simetria em relação a dois eixos ortogonais, no que refere à rigidez lateral e à distribuição de massas;
- 2) Garantir uma forma compacta em planta, isto é, cada piso deve ser delimitado por uma linha poligonal convexa (no que respeita à forma estrutural em planta definida pelos vários elementos verticais não contando, por exemplo, com varandas em consola, caso estas existam), sendo que, caso existam reentrâncias ou bordos recuados, estas não deverão afetar a rigidez do piso em planta e a área entre a linha exterior do piso e a linha poligonal convexa não deverá exceder em 5% da área do piso;

- 3) Garantir que a rigidez dos pisos no plano seja suficientemente grande em relação à rigidez lateral dos elementos estruturais verticais, para que a deformação do piso tenha um efeito reduzido na distribuição das forças entre os elementos;
- 4) A esbelteza do edifício em planta, λ , deverá respeitar a seguinte condição:

$$\lambda = \frac{L_{max.}}{L_{min.}} \leq 4 \quad (3.2)$$

Em que,

$L_{max.}$ – maior dimensão em planta;

$L_{min.}$ – menor dimensão em planta.

No primeiro nível, no caso de haver uma caixa de elevador ou núcleo de escadas deve-se perceber se estão localizadas no centro do edifício, pois são elementos de elevada rigidez, essenciais para a resistência global do edifício às ações horizontais (Santos, 2011). Neste parâmetro a classe de vulnerabilidade é quantificada a partir das seguintes irregularidades em planta:

- Localização excêntrica da caixa de elevador;
- Maior dimensão do edifício em planta superior a 4 vezes a menor dimensão do edifício em planta;
- Configuração em planta compacta.

Na Tabela 11 apresenta-se as classes de vulnerabilidade para o parâmetro P4.

Tabela 11- Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P4.

| Classe | Identificação do número de irregularidades no edifício |
|----------|--|
| A | Edifício sem qualquer irregularidade |
| B | Edifício com uma fonte de irregularidade |
| C | Edifício com duas fontes de irregularidades |
| D | Edifícios com três fontes de irregularidades |

Parâmetro P5 – Irregularidade em altura

O presente parâmetro avalia os edifícios quanto à sua irregularidade em altura. Importa perceber, se as estruturas apresentam recuos, descontinuidade do caminho de cargas e uma altura diferente entre pisos.

O parâmetro P5 analisa a diferença entre massas e áreas dos pisos consecutivos, fazendo ainda uma avaliação rigorosa da variação da rigidez em altura. Os edifícios que apresentam uma estrutura em pórtico ao nível do rés-do-chão introduzem uma irregularidade estrutural em relação aos pisos superiores. Segundo o Eurocódigo 8, um edifício é regular em altura quando os seguintes critérios sejam cumpridos:

- 1) O seu sistema de resistência lateral deverá ser contínuo, desde as fundações até ao topo do edifício;
- 2) A massa e a rigidez lateral de cada piso deverão ser constantes ou decrescerem gradualmente, sem variações abruptas, desde a base até ao topo do edifício;
- 3) Nos edifícios em pórtico, não deverá haver uma variação abrupta do quociente entre a resistência efetiva disponível e a resistência requerida pela análise;
- 4) Caso ocorram recuos, será necessário verificar as seguintes disposições:
 - Se ocorrerem recuos graduais da fachada em altura, preservando a simetria axial da estrutura em qualquer piso, o recuo não deverá exceder em 20% a dimensão relativa à direção do recuo, do piso anterior, como apresentado na Figura 4.

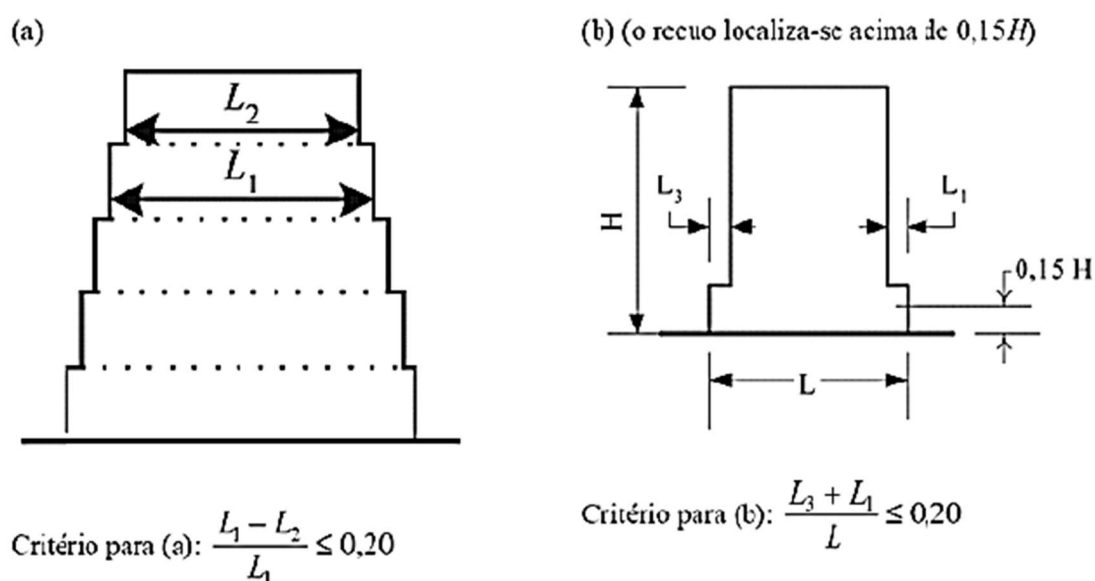
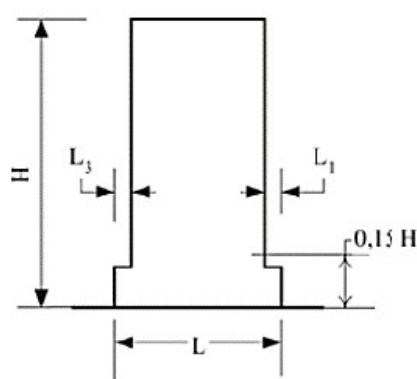


Figura 4 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo a) e b). Fonte: (CEN, 2004).

- A estrutura poderá ainda ser regular em altura mesmo que ocorra um recuo maior que os supracitados 20%, desde que este seja inferior a 50% da dimensão paralela na base do edifício e esteja situado nos 15% inferiores da altura total do edifício (acima do nível de aplicação da ação sísmica), assegurando-se igualmente que a simetria é mantida. Note-se que, neste caso, será necessário que a estrutura, na zona de projeção vertical da parte superior do edifício acima do recuo, seja capaz de resistir a pelo menos 75% da força de corte horizontal que apareceria entre pisos, num edifício idêntico, mas sem o alargamento da base, como demonstrado na Figura 5.

(c) (o recuo localiza-se abaixo de $0,15H$)

Critério para (c): $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,50$

Figura 5 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo c). Fonte: (CEN, 2004).

- Caso ocorram recuos que não preservem a simetria, a soma dos recuos em todos os pisos não deverá ser maior do que 30% da dimensão em planta do primeiro piso, sendo que em cada piso o recuo que surja não poderá exceder 10% da dimensão do piso anterior, tal como se ilustra na Figura 6.

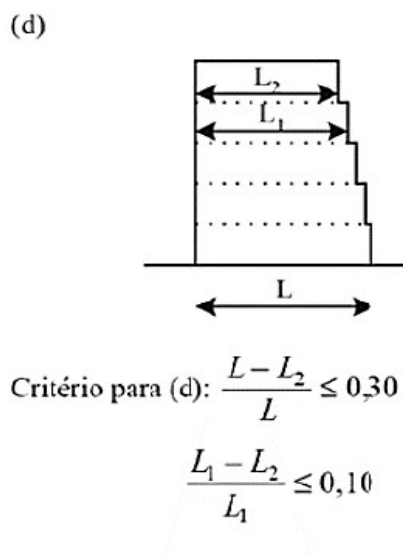


Figura 6 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo d). Fonte:(CEN, 2004).

No caso de o edifício não apresentar qualquer tipo de recuo atribui-se a classe de vulnerabilidade A. Consoante o tipo de recuo, a classe de vulnerabilidade varia. Nas Tabelas 12, 13 e 14 descrevem-se as classes de vulnerabilidade para cada tipo de recuo.

Tabela 12 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo a) e b).

| Classe | Geometria do edifício em altura |
|----------|---|
| B | Edifício que apresenta um recuo em qualquer piso que varia entre 20% a 30% da dimensão em planta do nível inferior na direção do recuo. Edifício com uma torre de altura inferior a 10% da altura total do edifício. |
| C | Edifício que apresenta um recuo em qualquer piso que varia entre 30% a 40% da dimensão em planta do nível inferior na direção do recuo. Edifício com uma torre de altura superior a 10% e inferior a 40% da altura total do edifício. |
| D | Edifício que apresenta um recuo em qualquer piso superior a 40% da dimensão em planta do nível inferior na direção do recuo. Edifício com uma torre de altura igual ou superior a 40% da altura total do edifício. |

Tabela 13 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo c).

| Classe | Geometria do edifício em altura |
|----------|---|
| B | Edifício que apresenta um único recuo localizado nos 15% inferiores da altura total do sistema estrutural principal, o recuo varia entre os 50% e inferior a 60% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura inferior a 10% da altura total do edifício. |
| C | Edifício que apresenta um único recuo localizado nos 15% inferiores da altura total do sistema estrutural principal, o recuo varia entre os 60% e inferior a 70% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura superior a 10% e inferior a 40% da altura total do edifício. |
| D | Edifício que apresenta um único recuo localizado nos 15% inferiores da altura total do sistema estrutural principal, o recuo é superior a 70% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura igual ou superior 40% da altura total do edifício. |

Tabela 14 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo d).

| Classe | Geometria do edifício em altura |
|----------|--|
| B | Edifício que apresenta recuos não simétricos, em cada lado, dos recuos de todos os pisos varia entre 30% a 40% da dimensão em planta ao nível do piso acima da fundação ou acima do nível superior de cava rígida, e cada recuo não deve ser superior a 10% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura inferior a 10% da altura total do edifício. |
| C | Edifício que apresenta recuos não simétricos, em cada lado, dos recuos de todos os pisos varia entre 40% a 50% da dimensão em planta ao nível do piso acima da fundação ou acima do nível superior de cava rígida, e cada recuo não deve ser superior a 10% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura superior a 10% e inferior a 40% da altura total do edifício. |
| D | Edifício que apresenta recuos não simétricos, em cada lado, dos recuos de todos os pisos superior a 50% da dimensão em planta ao nível do piso acima da fundação ou acima do nível superior de cava rígida, e cada recuo não deve ser superior a 10% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura superior a 40% da altura total do edifício. |

A existência de pisos comerciais no rés-do-chão dos edifícios, ou de pisos técnicos, lojas, escritórios em pisos superiores pode introduzir alterações significativas das secções dos elementos resistentes de pisos para pisos. As descontinuidades das secções de elementos estruturais como paredes resistentes e pilares introduzem descontinuidades na resposta e agravam os esforços nas zonas de transição. As alterações da altura do pé direito dos andares introduzem descontinuidades na rigidez da estrutura em altura. Se o edifício em análise

apresentar alguma destas situações, dever-se-á escolher uma classe de vulnerabilidade acima, até ao máximo de duas penalizações (Rodrigues, 2005).

Parâmetro P6 – Existência de mecanismo de *soft-storey*

No parâmetro P6 é estudado a possível formação de mecanismo tipo *soft-storey* nos edifícios.

O mecanismo *soft-storey* está associado a uma irregularidade de rigidez ou resistência em altura. Geralmente, este mecanismo ocorre no piso do rés-do-chão por questões arquitetónicas ou para espaços reservados para função comercial. Este tipo de estruturas apresenta o seu piso térreo muito fraco e flexível em relação aos restantes pisos superiores, concentrando assim no piso do rés-do-chão as deformações devido à ação sísmica (Romãozinho, 2008). Os pilares do rés-do-chão ficam sujeito a grandes deslocamentos horizontais entre as suas extremidades, com efeitos de segunda ordem consideráveis que ditam muitas vezes a sua rotura e o consequente colapso dos edifícios. Na Tabela 15 apresenta-se as duas classes de vulnerabilidade utilizadas neste parâmetro.

Tabela 15 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P6.

| Classe | Identificação de mecanismo <i>soft-storey</i> |
|--------|---|
| A | Edifício sem potencial mecanismo <i>soft-storey</i> |
| D | Edifício com potencial mecanismo <i>soft-storey</i> |

Parâmetro P7 – Presença de pilares curtos

Neste parâmetro é importante ter conhecimento da existência de pilares curtos nas estruturas, tanto nos pisos superiores como na base dos edifícios.

Em muitos casos, as paredes de alvenaria não completam totalmente toda a altura do piso, devido as aberturas das janelas e portas, deixando uma parte do pilar exposta. Estas situações originam maiores esforços de corte, potenciando mecanismos de rotura por corte destes pilares, os mecanismos de pilar curto (*short-column*) (H. Rodrigues, 2005).

As paredes de alvenaria impedem a deformação lateral da parte inferior dos pilares, levando a uma grande concentração de esforços de corte nestas zonas (Bhatt, 2007; Lopes, 2008). Na Tabela 16 apresenta-se as classes de vulnerabilidade.

Tabela 16 - Definição das classes de vulnerabilidade para parâmetro P7.

| Classe | Identificação de pilares curtos |
|---------------|---|
| A | Edifício que não apresente pilares curtos |
| B | Edifício que apresente possíveis pilares curtos num dos seus pisos superiores |
| C | Edifício que apresente possíveis pilares curtos em vários pisos ou um edifício que apresente pilares curtos na base do edifício |
| D | Edifício apresente mais que um possível pilar curto em pisos semi-enterrados capazes de criar um mecanismo de piso |

Parâmetro P8 – Outros elementos

No parâmetro P8 avalia a presença de platibandas e de avançados nos edifícios.

As platibandas, os avançados e as varandas, em caso de colapso, poderão colocar pessoas em risco ou agravar o nível de dano dos elementos estruturais (CEN, 2004). A definição das classes de vulnerabilidade associadas ao parâmetro P8 são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P8.

| Classe | Identificação de elementos não estruturais do edifício |
|---------------|---|
| A | Edifício sem elementos não estruturais vulneráveis |
| B | Edifício com platibandas na cobertura e/ou nas varandas |
| C | Edifício com avançados |
| D | Edifício com avançados e platibandas na cobertura e/ou nas varandas |

3.1.2. Grau de confiança – Classificação EMBA

Uma vez que existe um nível de incerteza associado à escolha da classe de vulnerabilidade de cada parâmetro na definição do I_v , como consequência do modo como foram realizadas as inspeções, estabeleceu-se uma classificação para o grau de confiança, com o intuito de associar a cada parâmetro avaliado uma medida da fiabilidade da escolha efetuada para a classe de vulnerabilidade. A classificação do grau de confiança é quantificada através de quatro níveis de avaliação, **Elevado – Médio – Baixo - Ausente**, sendo que cada letra corresponde ao rigor presente em cada parâmetro (Vicente, 2008). Na Tabela 18, apresenta-se a descrição geral dos quatro níveis do grau de confiança.

Tabela 18 - Definição geral dos quatro níveis do grau de confiança. (Fonte: Vicente, 2008).

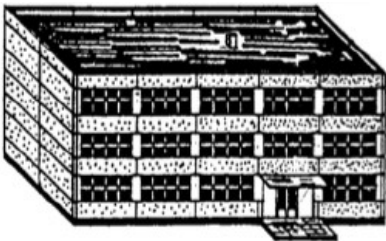
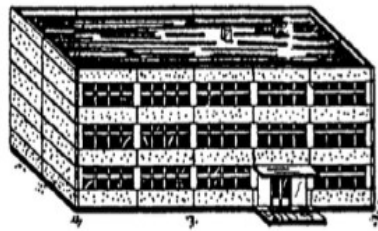
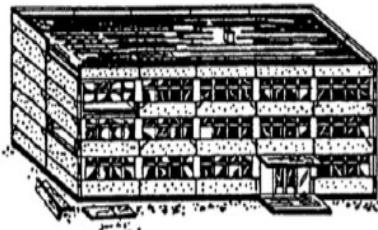
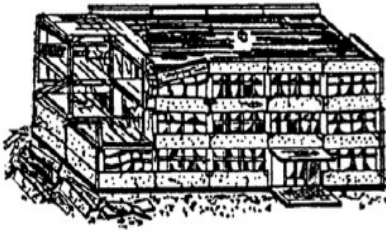

| Grau de confiança | Nível de informação |
|--------------------------|---|
| E (Elevado) | Informação de origem direta, ou seja, através de observação e medições " <i>in situ</i> ", implicando um conhecimento preciso da geometria, materiais e soluções construtivas do edifício. Inclui consulta de informação escrita e peças desenhadas do projeto. Informação com um grau de confiança próximo do exato. |
| M (Médio) | Informação apoiada na avaliação indireta por meio de: visualização de fotografias, consulta de informação direta de situações análogas bem documentadas e quantificadas, consulta de bibliografia da especialidade, conhecimento de opiniões técnicas e de informação oral credível. |
| B (Baixo) | Impossibilidade de observação direta. Informação baseada em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos comuns de projeto e execução, no que respeita à época e regionalidade da construção, ou baseada em informação oral não consensual. Estimativas resultantes de observação visual. |
| A (Ausente) | Informação adotada com um grau de incerteza próximo do da escolha casual. A atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Em anexo, apresenta-se a definição dos níveis de confiança correspondentes a cada parâmetro.

3.2. Grau de dano em edifícios de betão armado

O comportamento sísmico de um determinado edifício depende da sua tipologia construtiva. Assim, na Tabela 19 apresenta-se os diferentes graus de dano que podem ser observados em edifícios de betão armado. Esta classificação é estabelecida pela EMS-98. A escala varia entre D1, que corresponde a danos ligeiros até ao D5, que provocará o colapso da estrutura.

Tabela 19 - Classificação dos graus de danos de edifícios em betão armado. Fonte: (Grünthal, 1998).

| Grau de Dano (D) | |
|---|---|
|  | D1 – Danos negligenciáveis a leves Não há danos estruturais. Danos não estruturais ligeiros. Presença de algumas fissuras. Queda de estuques. |
|  | D2 – Danos moderados Danos estruturais ligeiros. Danos não estruturais moderados. Presença de fendas em colunas, molduras e paredes estruturais. Fendas em paredes divisórias. Queda de estuques. |
|  | D3 – Danos severos Danos estruturais moderados. Danos não estruturais graves. Presença de fendas em colunas, juntas, etc. Descasque do recobrimento de betão, encurvadura das armaduras comprimidas. Grandes fissuras em paredes divisórias. |
|  | D4 – Danos muito graves Danos estruturais graves. Danos não estruturais muito graves. Grandes aberturas nos elementos estruturais. Inclinação de coluna e/ou colapso de algumas colunas ou de um piso superior. |
|  | D5 – Colapso Destruição colapso total ou parcial da estrutura. |

3.3. Implementação da ferramenta SIG

Os sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm a capacidade de relacionar e gerir um vasto conjunto de informação, como por exemplo, características construtivas, identificação do valor patrimonial, vulnerabilidade do edificado e estimativa de dano (Vicente, 2008).

Na presente dissertação utilizou-se o *software* de Informação Geográfica *open source* QGIS (Open Source Geospatial Foundation, 2007), de forma a analisar e a organizar espacialmente os resultados. O ambiente SIG combina informação gráfica georreferenciada (informação vetorizada e ortofotomapas) com informação em formato de tabelas, associada às entidades gráficas. Tal como representado na Figura 7, neste caso específico um polígono, que corresponde a um edifício, está associado a uma série de atributos e características. O SIG criado permite uma visão global de toda a área de estudo.



Figura 7 - Representação dos edifícios do caso de estudo com auxílio do *software* QGIS.

3.4. Comentários finais

Este capítulo serviu para apresentar e justificar, de forma detalhada, a escolha da metodologia de avaliação simplificada. Esta foi a metodologia escolhida devido ao objetivo de se realizar uma avaliação relativamente rápida numa escala urbana e com recurso a informações através de fotografia.

A presente metodologia incide sobre a descrição de 8 parâmetros, descrito ao longo do capítulo, que permitem o cálculo do índice de vulnerabilidade correspondente a cada um dos edifícios avaliados. O peso do parâmetro varia dependendo dos critérios avaliados, assim alguns parâmetros têm maior influência no valor do índice de vulnerabilidade. De forma a avaliar o grau de incerteza na avaliação destes parâmetros recorreu-se à classificação EMBA, descrita ao longo do capítulo.

Neste capítulo descrevem-se os vários graus de dano que poderão ser observados nos edifícios após ocorrência de um sismo de D1 a D5.

No capítulo seguinte descreve-se as zonas urbanas em que será aplicada a metodologia descrita ao longo deste capítulo.

Capítulo 4

**CASO DE ESTUDO – O CENTRO URBANO DA
CIDADE DE FARO**

4. CASO DE ESTUDO – O CENTRO URBANO DA CIDADE DE FARO

4.1. Breve enquadramento histórico

A cidade de Faro é a capital da região e do concelho do Algarve, com cerca de 60 000 habitantes. Inicialmente, denominada por Ossónoba, em português “armazém do sal”, ao longo dos séculos sofreu inúmeras alterações. Em meados do século XVI, acompanhando a história da cidade, Faro organizou-se com a sua forma atual (Diniz, 1981; Maio *et al.*, 2015b).

Em 1755, a cidade de Faro foi completamente arrasada pelo “Grande Terramoto de Lisboa”. Em consequência, aquando da reconstrução e reestruturação da cidade, são construídas a grande maioria das mais notáveis obras de arquitetura, dando-se uma nova e harmoniosa identidade ao núcleo urbano antigo da cidade (Maio *et al.*, 2015b).

Em 1969, um novo terramoto, com uma magnitude de, aproximadamente, 7.3 na escala de Richter, afetou toda a região do Algarve, inclusive Faro. Muitos relatos revelam que os edifícios em taipa e adobe ruíram e os edifícios tradicionais de alvenaria de pedra sofreram danos consideráveis, devido à falta de travamento entre as paredes resistentes e ao deficiente estado de conservação em que as estruturas se encontravam (Marecos, 1970). Os edifícios mais recentes de alvenaria e de betão armado sofreram danos considerados ligeiros (Maio *et al.*, 2015b).

4.2. Evolução da malha urbana e dinâmica construtiva

Inicialmente, a cidade de Faro era composta por uma ilha muralhada, denominado Vila Adentro. Posteriormente, com a construção dos edifícios administrativos e religioso, houve a necessidade de expandir a cidade. Na sequência dessa expansão, surgiram os núcleos urbanos do Bairro da Mouraria e do Ribeirinho (Maio *et al.*, 2015b).

Atualmente, o centro histórico de Faro encontra-se subdividido em três núcleos edificados, associados às áreas de reabilitação urbana delimitadas pela Câmara Municipal de Faro. Na

Figura 8 apresenta-se os 3 núcleos: Vila Adentro (zona A), Bairro da Mouraria (zona B) e Bairro Ribeirinho (zona C).

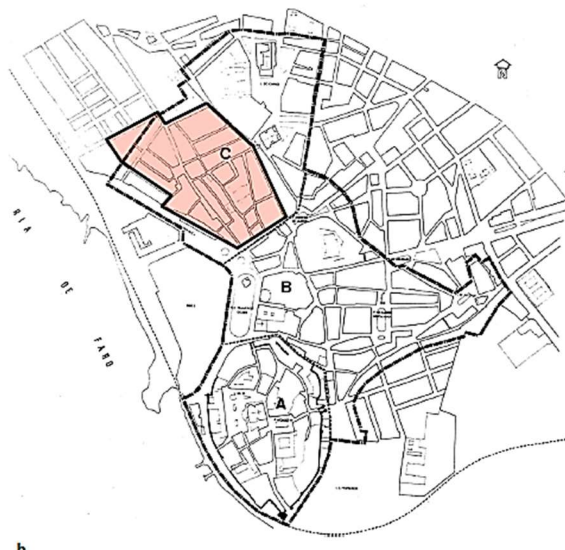


Figura 8 - Localização dos 3 núcleos edificados: Vila Adentro (zona A), Bairro da Mouraria (zona B) e Bairro Ribeirinho (zona C) (Fonte: Maio et al., 2015b).

Na Figura 9 está representada a zona urbana que será alvo de estudo.

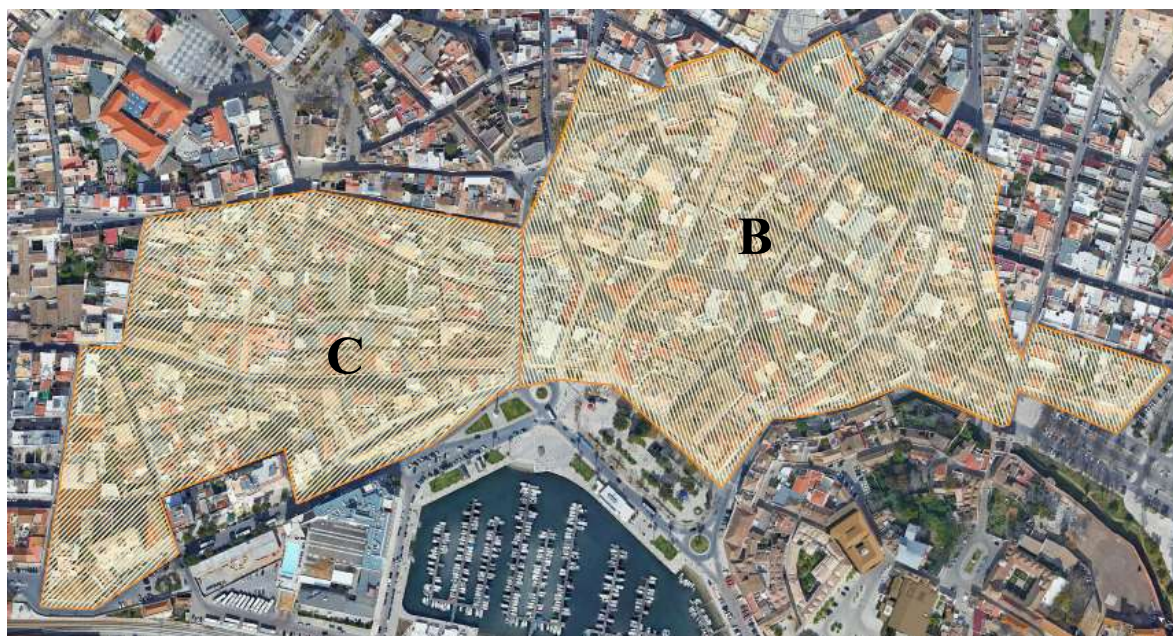


Figura 9 - Morfologia urbano do caso de estudo constituído pelo Bairro Ribeirinho (C) e pelo Bairro da Mouraria (B) (fonte: Google Street View, 2016).

Nas secções seguintes é apresentado de forma mais detalhada a malha urbana constituída pelo Bairro Ribeirinho e pelo Bairro da Mouraria.

4.3. Bairro Ribeirinho

O Bairro Ribeirinho, ao longo do tempo, adquiriu peso e protagonismo no contexto económico e social da cidade, tendo como principal eixo viário a rua de São Pedro, por meio da ligação entre os referidos edifícios notáveis e a rua Direita (atual rua Conselheiro Bivar), tal como ilustrado na Figura 10. Na Figura 11, é apresentado o Bairro Ribeirinho tal como será representado através do *software* QGis.

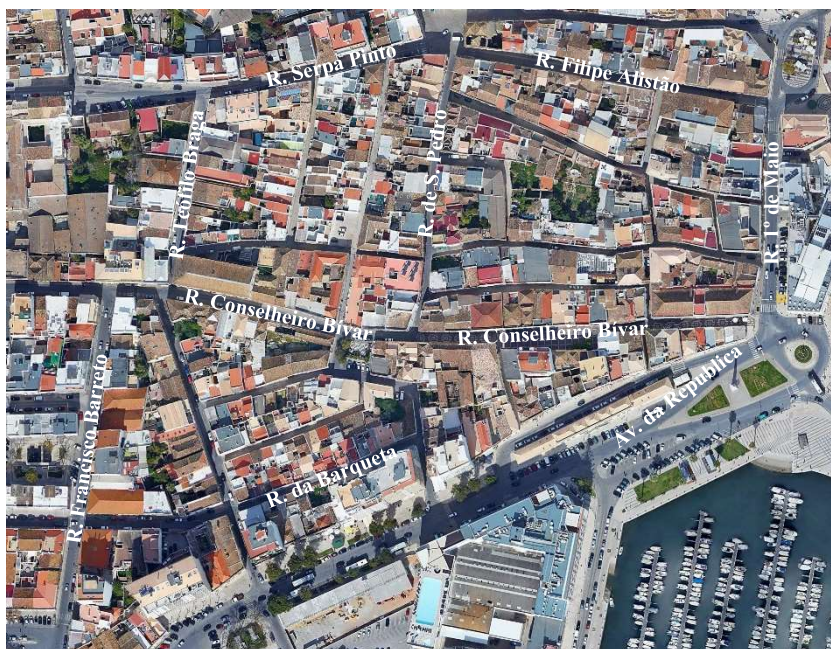


Figura 10 - Vista área do Bairro Ribeirinho (fonte: Google Street View, 2016).

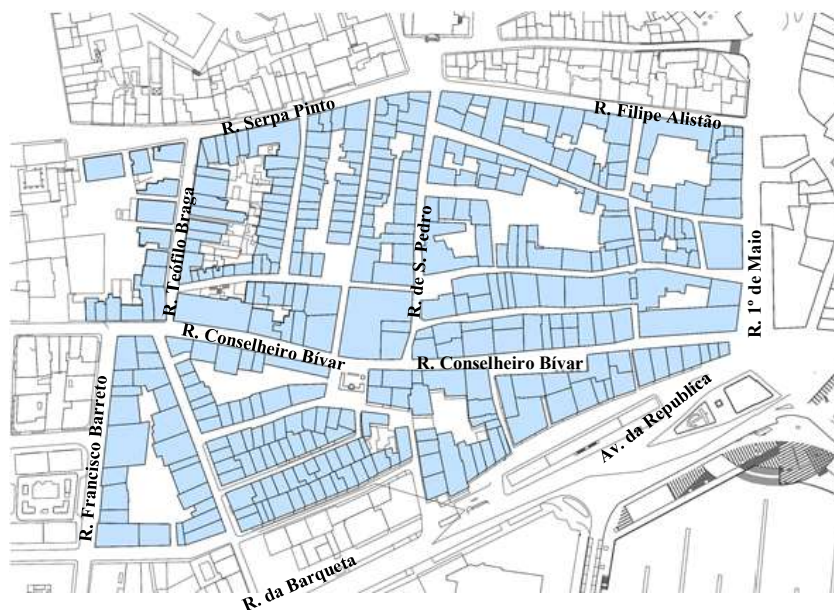


Figura 11 - Planta atual da malha urbana do Bairro Ribeirinho.

Na Figura 12 está representado as duas principais ruas do Bairro Ribeirinho, a Rua S. Pedro e a Rua Conselheiro Bívar (pedonal).



a)



b)

Figura 12 - a) Rua S. Pedro. b) Rua Conselheiro Bívar.

A destruição causada pelo terremoto de 1755 provocou as primeiras alterações morfológicas, construindo-se novas e pequenas habitações unifamiliares. Assim, os grandes armazéns que existiam nesta zona, e cuja utilização estaria já comprometida pelo acentuado abrandamento das trocas comerciais da zona, foram sendo gradualmente substituídos. É sob esta forma que o Bairro Ribeirinho se apresenta atualmente, contando, porém, com a presença de inúmeras alterações e intervenções a vários níveis. Muitas destas intervenções foram realizadas recentemente e, acabaram por descaraterizar parte deste edificado, relevando a falta de consciencialização sobre a questão de preservação e valorização do património arquitetónico (Maio *et al.*, 2015b).

O Bairro Ribeirinho é uma zona com grande concentração de edifícios de alvenaria de pedra, sendo que grande parte destes não sofreram alterações a nível estrutural (Maio *et al.*, 2015b). Porém a presente dissertação pretende avaliar a vulnerabilidade sísmica dos 63 edifícios em betão armado, cuja presença se encontra já identificada na Figura 13.



Figura 13 - Identificação dos edifícios em betão armado do Bairro Ribeirinho.

4.4. Bairro da Mouraria

O Bairro da Mouraria, tal como é apresentado na Figura 14, tem como eixo viário a rua 1º de Dezembro (pedonal), tendo como limites, a ponte o Jardim Manuel Bívar e a nascente Praça Alexandre Herculano. A norte localiza-se a rua Primeiro de Maio que é a fronteira entre o Bairro Ribeirinho e o Bairro da Mouraria. Na Figura 15, é ilustrado o bairro tal como será representado através da ferramenta QGIS.



Figura 14 - Vista área do Bairro da Mouraria (fonte: Google Street View, 2016).

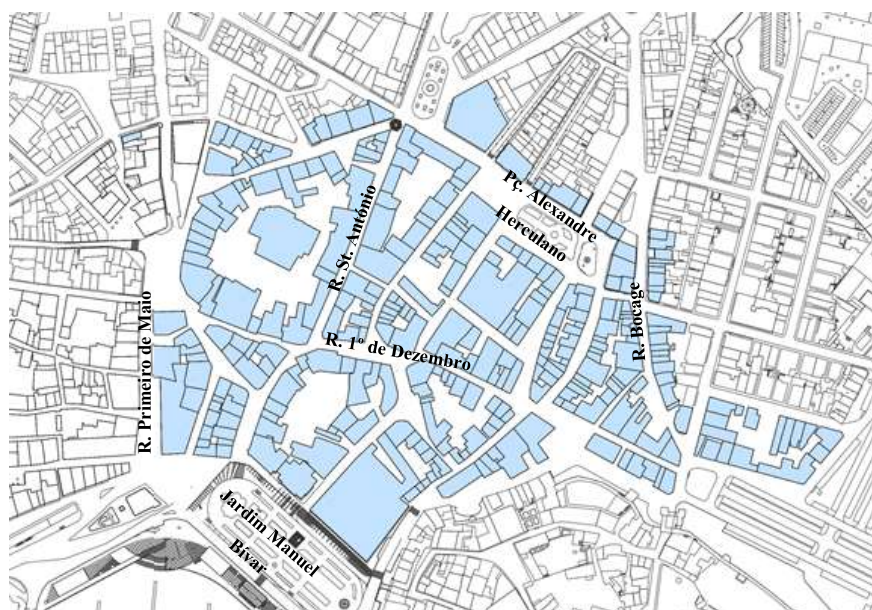


Figura 15 - Planta atual da malha urbana do Bairro da Mouraria.

Na Figura 16 é apresentado a Rua 1º de Dezembro (pedonal), bastante movimentada e de zona comercial, e a Rua Primeiro de Maio, limite entre o Bairro Ribeirinho e Bairro da Mouraria.



Figura 16 -a) Rua 1º de Dezembro. b) Rua Primeiro de Maio.

O Bairro Mouraria é uma zona com elevado número de edifícios de valor patrimonial, ocupada maioritariamente por edifícios do século XIX e XX. Não obstante, a norte da Rua Stº António, é possível encontrar uma minoria de edifícios pertencentes à segunda metade do século XVIII. Na Figura 17 apresenta-se o mapeamento da época de construção relativa aos edifícios que constituem o Bairro da Mouraria

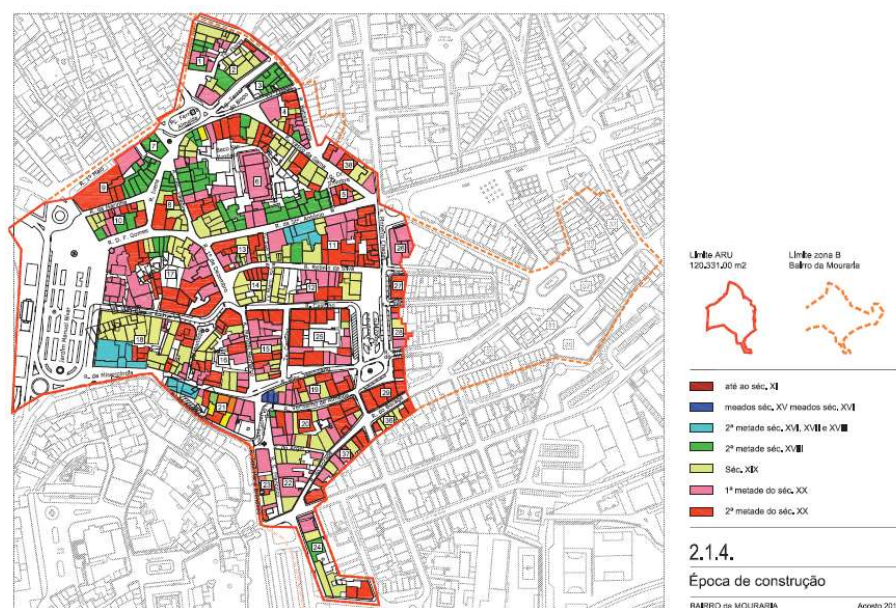


Figura 17 - Época construção Bairro Mouraria (ARU, 2011).

Através da observação exterior, a Câmara Municipal de Faro elaborou um levantamento do estado de conservação dos edifícios. Este estudo incidiu sobre 370 edifícios. De maneira geral, conclui-se que grande parte dos edifícios se encontram em bom estado, sendo que apenas uma pequena parte das estruturas avaliadas está em ruína (CMFaro, 2011).

O Bairro da Mouraria pode ser dividido em duas zonas através da Rua Rebelo da Silva. A norte desta via pedonal verifica-se uma grande concentração de estabelecimentos comerciais, de restauração e bebidas, que foram substituindo os edifícios habitacionais que existiam anteriormente. A sul da Rua Rebelo da Silva aconteceu o inverso, ou seja, houve um aumento gradual dos edifícios habitacionais, pese embora estes mantenham ainda estabelecimentos comerciais no rés-do-chão e alguns serviços dispersos nos pisos superiores, os quais foram identificados como “mistos”.

Para além de toda a informação obtida através da ARU do Bairro da Mouraria, realizou-se um trabalho de campo por este bairro. Assim, foi possível observar e fotografar pormenores com importância para o cálculo do índice de vulnerabilidade.

Na Figura 18 estão identificados todos os edifícios de betão armado, localizados no Bairro da Mouraria.



Figura 18 - Identificação dos edifícios em betão armado do Bairro Mouraria.

4.5. Comentários Finais

Conhecer a malha urbana em estudo é fundamental para uma melhor avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios. Assim, ao longo do presente capítulo apresentou-se e analisou-se o Bairro Ribeirinho e o Bairro da Mouraria. A malha urbana em estudo é constituída por 166 edifícios em betão armado, sendo o Bairro Ribeirinho e o Bairro da Mouraria compostos por 63 e 103 edifícios, respetivamente, o que corresponde a cerca de 25% dos edifícios pertencentes aos dois bairros.

Importa referir que houve a necessidade de se realizar um trabalho de campo, fotografando todos os edifícios do Bairro da Mouraria, de forma a classificar com maior exatidão os parâmetros da metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade adotada.

No capítulo seguinte apresenta-se os resultados obtidos através da aplicação da metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica.

Capítulo 5

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA
DOS CASOS DE ESTUDO**

5. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo pretende-se aplicar a metodologia apresentada anteriormente, de modo a estudar a vulnerabilidade dos edifícios em betão armado pertencentes a uma malha urbana constituída pelo Bairro da Mouraria e pelo Bairro Ribeirinho. A metodologia foi aplicada a um total de 166 edifícios, pertencentes aos dois bairros.

Inicialmente, são apresentados os resultados de cada um dos parâmetros que compõem metodologia utilizada, e cuja descrição foi apresentada no Capítulo 3. Através destes foi possível obter o índice de vulnerabilidade de cada edifício em estudo. De seguida, foi analisado o grau de confiança associado à avaliação de cada parâmetro, através da classificação EMBA, de forma a quantificar o rigor da informação. Posteriormente, estimou-se o grau de dano para cada edifício.

5.1. Classificação dos parâmetros

Parâmetro P1 – Implantação do edifício

Para uma boa análise deste parâmetro é necessário conhecer o tipo de solo em que o edifício está localizado. Devido à falta de informação acerca do tipo de solo existente e recorrendo ao EC8 (Eurocódigo 8), optou-se por classificar o terreno como tipo C, considerando-se depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta. Todas as estruturas estão localizadas em terreno plano. Assim sendo, como se pode observar na Figura 19, todos edifícios foram classificados como B.

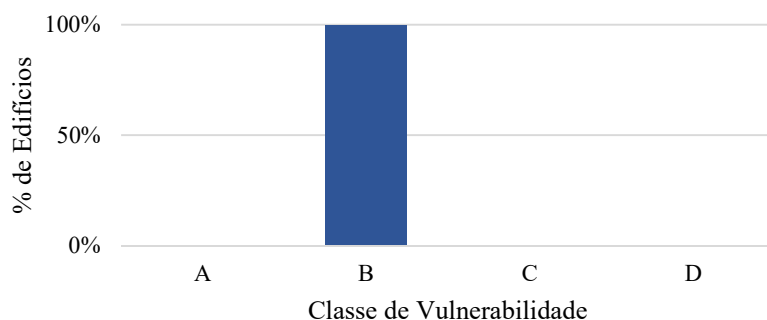


Figura 19 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P1 para o cálculo do I_v .

Parâmetro P2 – Posição no quarteirão

O parâmetro P2 envolve o conhecimento relativo do quarteirão onde o edifício está inserido. Na Figura 20 apresenta-se os resultados da classificação deste parâmetro. Tal como se pode observar, a classe de vulnerabilidade C foi atribuída a 65% dos edifícios. As restantes estruturas foram distribuídas de forma praticamente homogénea. 9% dos edifícios com classificação A estão localizados em “Banda Meio” e não tem desnível do pavimento superior a 0.5m.

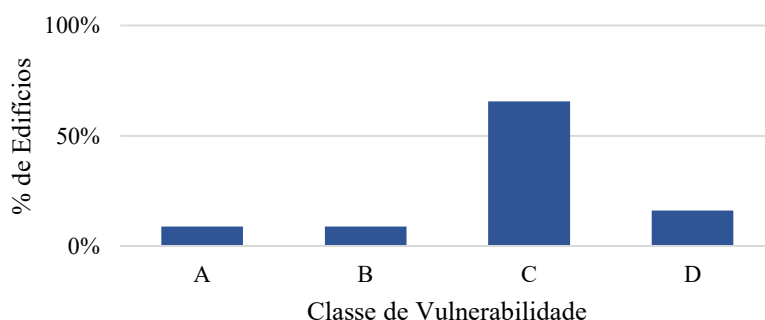


Figura 20 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P2 para o cálculo do I_v .

Parâmetro P3 – Idade do edifício

Devido à falta de informação relativo à datação dos edifícios, no Bairro Ribeirinho considerou-se que todas as estruturas em betão armado foram construídas antes 1985, altura em que, apesar do dimensionamento sísmico ser já tido em conta, o comportamento dinâmico da estrutura não era ainda considerado. O mesmo não aconteceu na classificação do Bairro da Mouraria, partindo da informação disponibilizada pela ARU, foi possível perceber quais os edifícios que foram construídos após 1985.

Tal como se pode observar na Figura 21, nenhum edifício foi classificado com classe de vulnerabilidade A, isto deve-se ao facto de admitir-se que todos os edifícios têm uma qualidade de construção “moderada”.

A distribuição dos valores pelas classes de vulnerabilidade B e D é praticamente homogénea, o que significa que em cerca de 50% dos edifícios, na altura do projeto, foi considerado o dimensionamento sísmico.

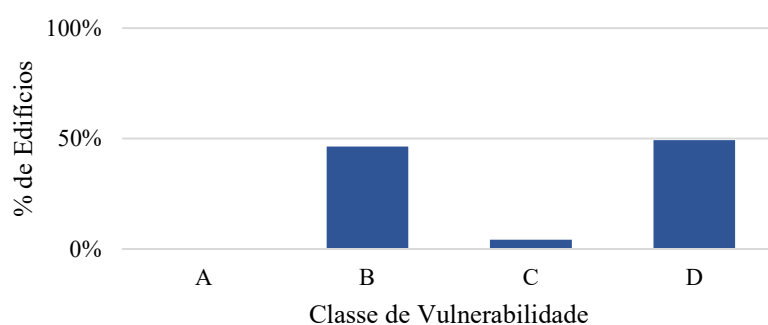


Figura 21 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P3 para o cálculo do I_v .

Parâmetro P4 – Irregularidade em planta

Um dos critérios deste parâmetro é a existência de caixa de elevador. Como a avaliação é feita através da observação visual pelo exterior, optou-se por admitir que nenhum dos edifícios era constituído por caixa de elevador, isto deve-se ao facto de ser difícil de perceber se a posição deste é excêntrica. Assim sendo, a falta de informação para este critério será refletida no grau de incerteza da classificação EMBA.

Após ter sido admitido que nenhuma estrutura tinha caixa de elevador, estas foram classificadas com uma classe de vulnerabilidade A. Como se pode observar na Figura 22, os 53% edifícios que estão avaliados com uma classe de vulnerabilidade B foram agravados uma classe devido à sua planta não ser compacta. Outros 3% edifícios avaliados com classe de vulnerabilidade C, apresentam a maior dimensão em planta quatro vezes superior à menor dimensão em planta.

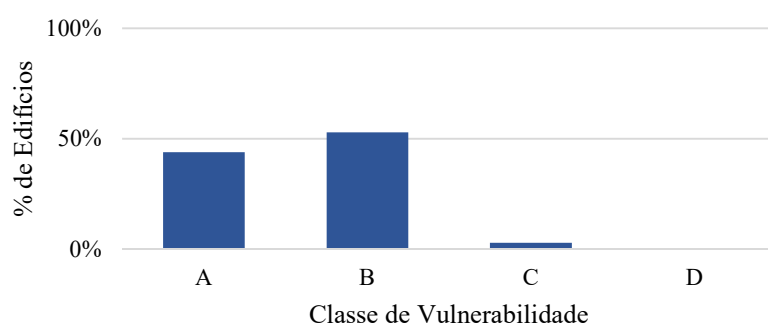


Figura 22 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P4 para o cálculo do I_v .

Parâmetro P5 – Irregularidade em altura

Na Figura 23 apresenta-se a distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade no Parâmetro P5. Como se pode observar, cerca de 20% dos edifícios foram classificados com uma classe de vulnerabilidade A, isto porque nenhum deles apresentam recuos, nem zonas comerciais no piso térreo, nem escritórios nos pisos superiores e de não haver diferença de pé direito entre pisos. Grande parte das restantes estruturas foram prejudicadas nas classes devido à presença de pisos comerciais e da diferença de pé direito entre pisos.

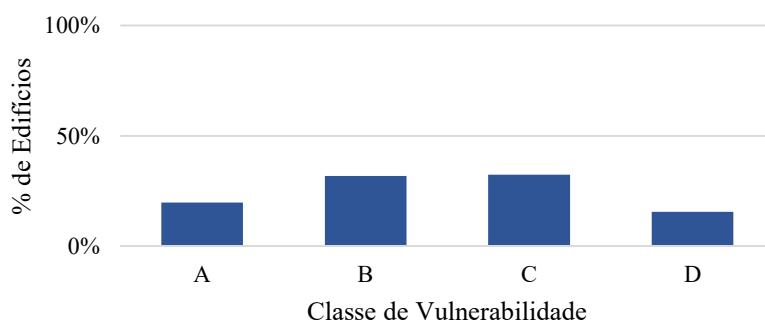


Figura 23 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P5 para o cálculo do I_v .

Parâmetro P6 – Existência de mecanismo de *soft-storey*

Na Figura 24 apresenta-se a distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade para o Parâmetro P6. Através da Figura 24, é possível constatar que os edifícios foram classificados apenas com as classes de vulnerabilidade A e D, isto acontece devido aos edifícios poderem ou não estar sujeitos à eventual presença de um mecanismo *soft-storey*.

Um dos critérios do Parâmetro P6 é a presença de zonas comerciais no rés-do-chão. Assim sendo, a partir da Figura 24 percebe-se que 60% dos edifícios são avaliados com uma classe de vulnerabilidade D, o que significa que o rés-do-chão destas estruturas estão destinados a zona comercial, o que faz com que este piso seja mais suscetível a deslocamentos horizontais e consequentemente mais frágeis que os pisos superiores. Nos restantes edifícios, avaliados com classe de vulnerabilidade A, considerou-se que o rés-do-chão apresenta o mesmo grau de vulnerabilidade que os pisos superiores.

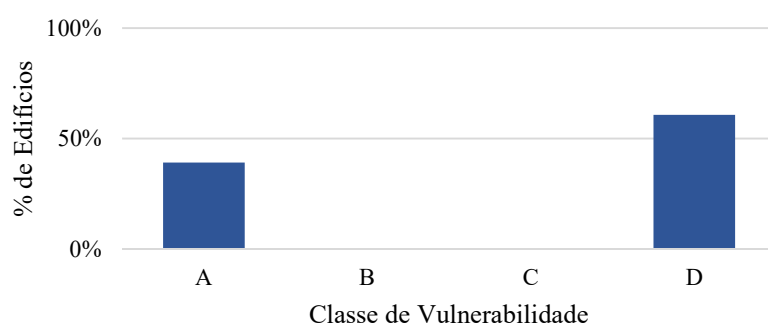


Figura 24 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P6 para o cálculo do I_v .

Parâmetro P7 – Presença de pilares curtos

Na Figura 25 apresentam-se os resultados obtidos da classificação do Parâmetro P7, onde se observa que 80% dos edifícios não possuem elementos onde poderá surgir a formação de um mecanismo tipo pilar curto, tendo sido por isso avaliados com classe de vulnerabilidade A. A classe de vulnerabilidade C é segunda com maior frequência, devido à presença de pilares curtos na base do edifício. Os 6% de edifícios avaliados com uma classe de vulnerabilidade B (%), apresentam pilares curtos nos pisos superiores. Apenas 4% dos edifícios possuem uma classe de vulnerabilidade D (%), apresentando mais do que um pilar curto em pisos semienterrados capazes de criar mecanismo de piso.

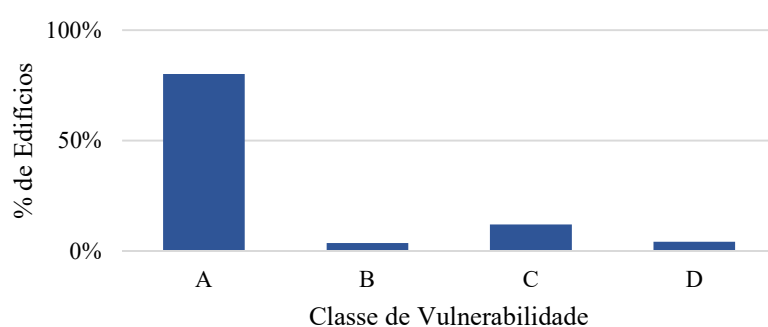


Figura 25 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P7 para o cálculo do I_v .

Parâmetro P8 – Outros elementos

Na Figura 26 apresenta-se a distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P8. Tal como está ilustrado na Figura 26, cerca de 40% edifícios apresentam uma classe de vulnerabilidade B, devido à presença de platibandas nas coberturas. 19% dos edifícios são constituídos por avançados, classificando com uma classe de vulnerabilidade C. Enquanto que 18% dos edifícios foram avaliados com uma classe de vulnerabilidade D, devido a serem constituídos tanto por platibandas como por avançados. Em contrapartida, 23% das estruturas não possuem nem platibandas, nem avançados. Assim sendo, foram classificados com classe de vulnerabilidade A.

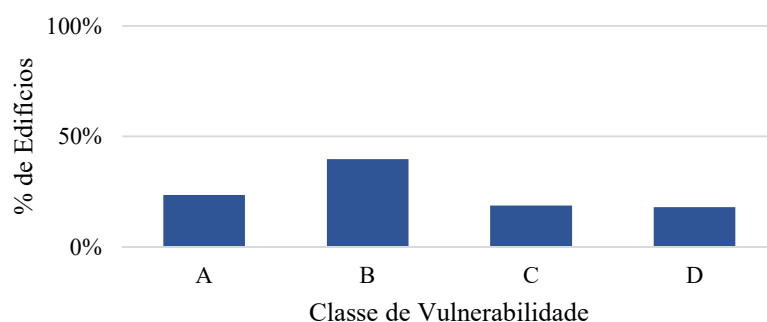


Figura 26 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P8 para o cálculo do I_v .

5.2. Influência dos parâmetros no Índice de Vulnerabilidade, I_v

A Figura 27 representa a influência de cada parâmetro no cálculo do I_v , de modo a facilitar a análise dos parâmetros com maior influência. Como se pode observar, o parâmetro P6, que corresponde à existência de mecanismo de *soft-storey*, é o parâmetro com maior percentagem de edifícios com classe de vulnerabilidade D com cerca de 60%, seguido do parâmetro P3, que avalia a idade do edifício, com cerca de 50%. Por outro lado, o parâmetro que incide sobre a existência de pilares curtos, P7, é o parâmetro com maior percentagem de estruturas com classe de vulnerabilidade A, com 80%. Em segundo lugar, destaca-se o parâmetro P4, que avalia a irregularidade em planta, com cerca de 44% dos edifícios.

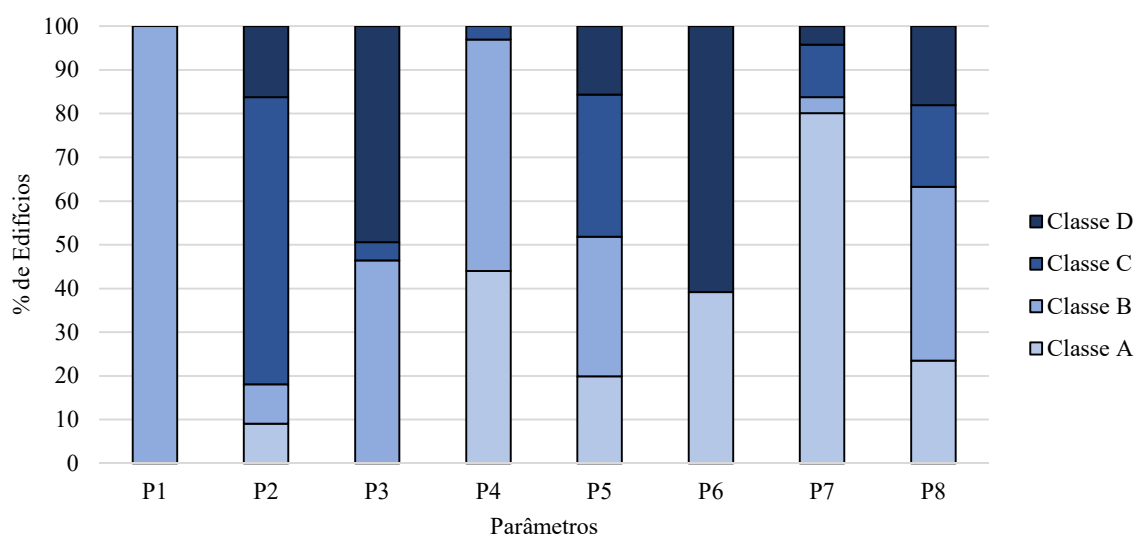


Figura 27 - Influência de cada parâmetro no cálculo do Índice de Vulnerabilidade, I_v .

5.3. Grau de confiança - EMBA

Na Figura 28 representa-se a distribuição da classificação EMBA pelos parâmetros. Relativamente ao parâmetro P1, em todos os edifícios, classificou-se como A (Ausente), devido à falta de informação do tipo de solo. Nos parâmetro P2, P5, P6, P7 e P8, o grau de confiança foi classificado como M (Médio), pelo facto da informação ser apoiada na avaliação indireta, tendo-se recorrido ao auxílio de fotografias obtidas através do trabalho de campo e do “*Google Street View*”. Em relação ao parâmetro P3, o grau de confiança foi avaliado como E (Elevado) para os edifícios pertencentes ao Bairro da Mouraria e como M (Médio) para as estruturas do Bairro Ribeirinho. A informação relativa ao Bairro da Mouraria foi retirado da ARU do respetivo bairro, enquanto que para o Bairro Ribeirinho foi assim classificado devido a não haver datação dos edifícios. Quanto ao parâmetro P4, assumiu-se que os edifícios com 1 e 2 pisos correspondiam a um grau de confiança E (Elevado), pelo facto de haver uma certeza que este tipo de edifício não terá caixa de elevador. Para as estruturas com 3 e 4 pisos optou-se por um grau de confiança M (Médio), devido ao facto de haver uma certa incerteza em relação à existência de uma caixa de elevador. Nos edifícios com mais de 4 pisos classificou-se como B (Baixo), pois é mais provável a presença de uma caixa de elevador neste caso do que nos edifícios com menos pisos.

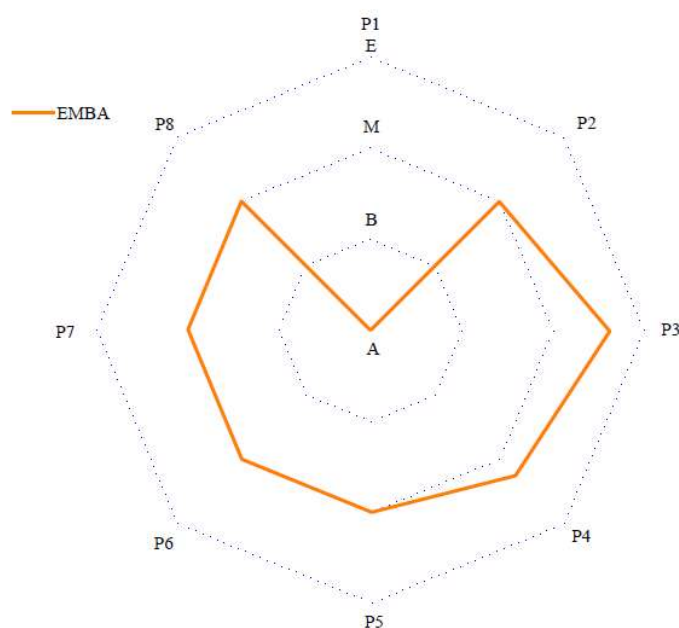


Figura 28 - Distribuição do grau de confiança dos parâmetros (P1 a P8).

5.4. Índices de vulnerabilidade

Aplicando a metodologia aos 166 edifícios obteve-se um índice de vulnerabilidade médio, \bar{I}_v , de 29.36. O desvio de padrão associado, σ_{Iv} , é aproximadamente 13.40. Na Figura 29, é apresentado o histograma de distribuição de valores do índice de vulnerabilidade. Através da análise dos valores apresentados verifica-se que os índices vulnerabilidade dos edifícios estudados são relativamente baixos em relação aos valores obtidos por Silva (2015). Cerca de 77% dos edifícios avaliados têm um índice de vulnerabilidade inferior a 40, sendo que apenas 5% dos edifícios apresentam um índice com valor superior a 50. O índice de vulnerabilidade máximo e mínimo obtido foi de 66.30 e 3.33, respetivamente.

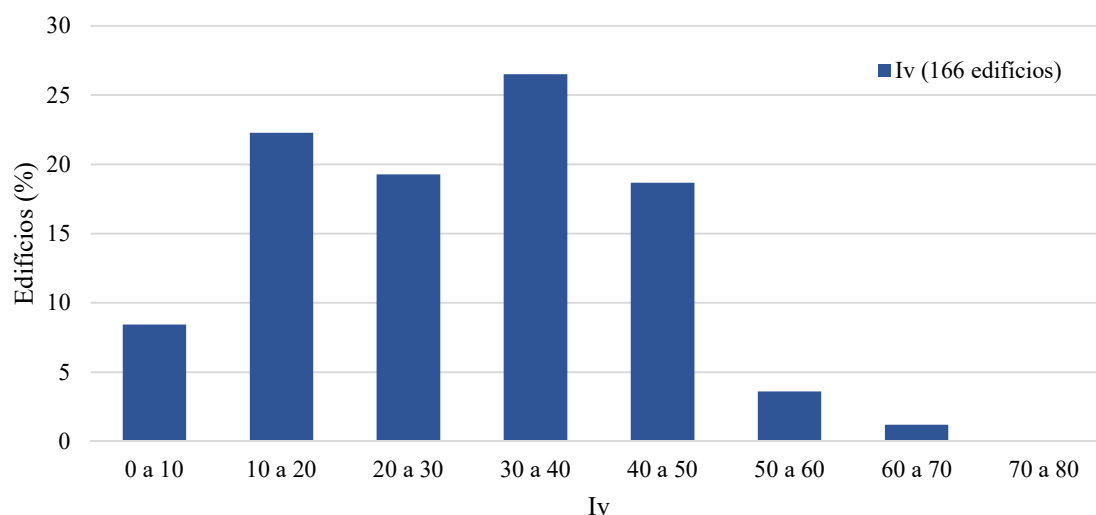


Figura 29 - Distribuição dos edifícios analisados pelos intervalos de valores dos índices de vulnerabilidade.

Na Figura 30 é representada a distribuição espacial dos índices de vulnerabilidade dos edifícios em betão armado avaliados. Através da escala de cores é possível perceber que grande parte dos edifícios tem um índice de vulnerabilidade relativamente baixo. O valor do índice de vulnerabilidade mais alto encontra-se associado a um edifício localizado no Bairro da Mouraria, na Rua Vasco da Gama, tendo 4 pisos visíveis, sendo que o rés-do-chão é destinado a uma zona comercial e os restantes pisos são de habitação. Para além disto, apresenta uma diferença entre alturas de piso e um recuo no último piso. Devido a estes fatores mais penalizadores, o índice de vulnerabilidade irá ser mais elevado em relação aos restantes edifícios. O menor índice de vulnerabilidade determinado é de 3.33 e corresponde a um edifício que está localizado, também ele, no Bairro da Mouraria, Largo de São Francisco. Constituído apenas por dois pisos, este edifício não tem qualquer zona comercial e não apresenta irregularidades em planta. Assim sendo, a maioria dos parâmetros têm classificação A, tendo isso influência direta no valor reduzido do índice de vulnerabilidade.

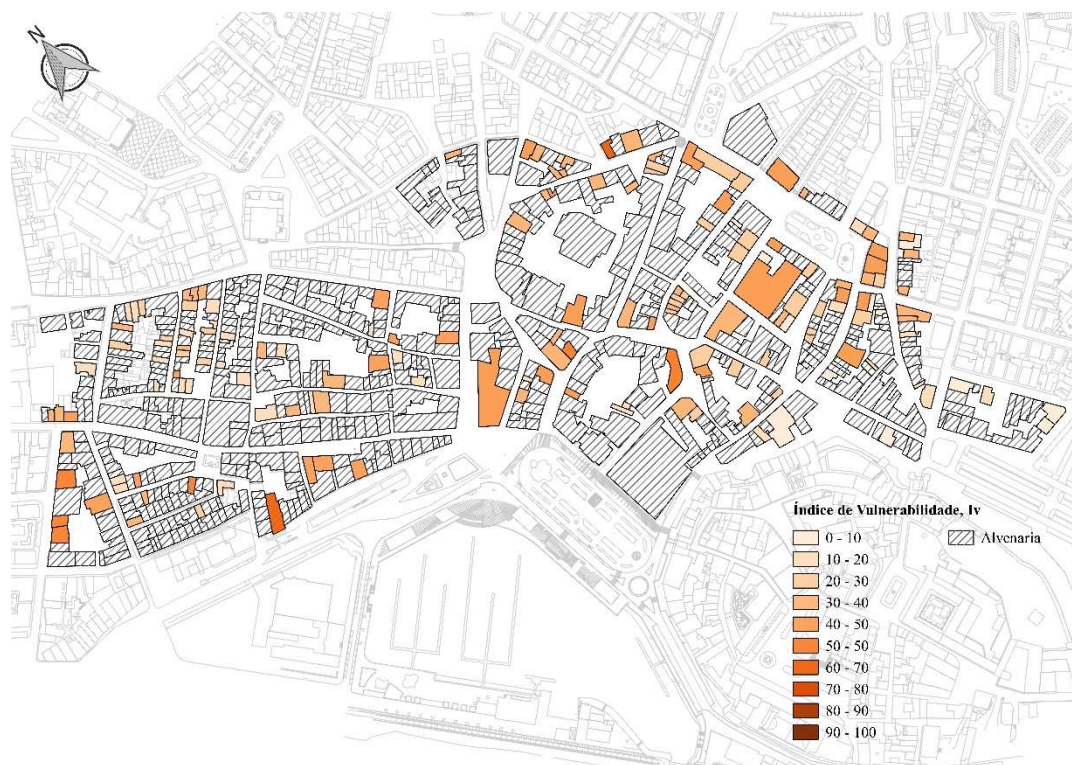


Figura 30 - Distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade.

5.5. Estimativa de dano

Após a determinação do índice de vulnerabilidade de cada edifício, interessa estimar o grau de dano, μ_D , para cada estrutura e para diferentes intensidades macrosísmicas, I (EMS-98). Segundo a calibração feita por Silva (2015), o grau de dano, variável entre 0 e 5, pode ser determinado através da Expressão (5.1).

$$\mu_D = 2.839 \times \left[1 \times \tanh \left(\frac{I + 10.79 \times V - 11.6}{5} \right) \right] \quad (5.1)$$

O valor de V foi obtido através da Expressão (5.2).

$$V = -0.02 + I_v \times 0.0104 \quad (5.2)$$

Através dos valores médios do grau de dano de cada intensidade macro sísmica foi possível construir as curvas de vulnerabilidade, representadas na Figura 31. Estas foram desenhadas através do $I_{\text{médio}}$, do $I_{\text{médio}} + \sigma$, do $I_{\text{médio}} - \sigma$, do $I_{\text{médio}} + 2\sigma$ e do $I_{\text{médio}} - 2\sigma$.

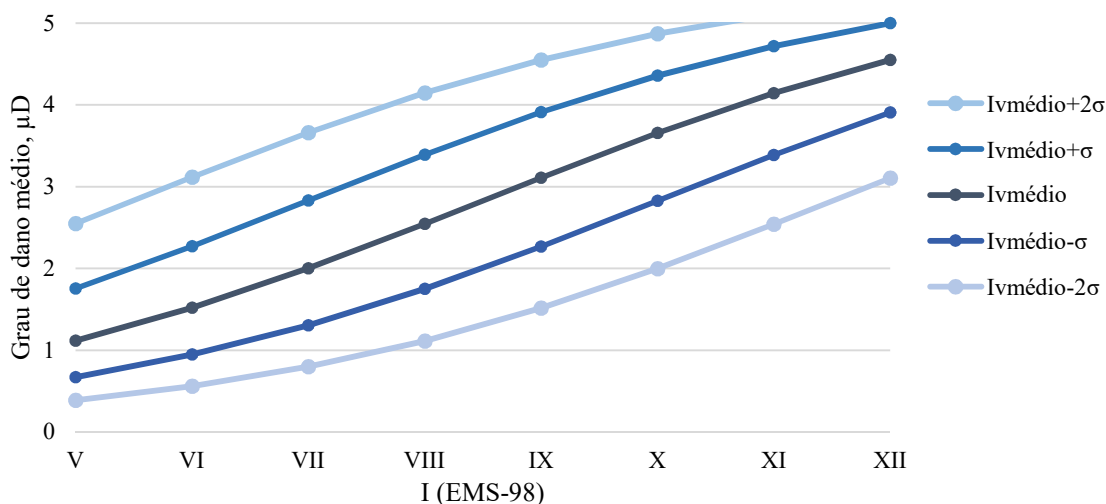


Figura 31 - Curvas de vulnerabilidade.

Na Figura 32 apresenta-se o grau de dano em relação à intensidade do sismo. Como já esperado com o aumento da intensidade sísmica o grau de dano aumenta. Um sismo com intensidade V, provocaria danos de grau D1 e D2, assim as estruturas poderiam ter danos não estruturais ou danos estruturais ligeiros (ver Tabela 19). Para níveis de intensidade superiores a VIII, a frequência de danos de grau D3 começa a ser considerável, provocando nas estruturas danos estruturais moderados.

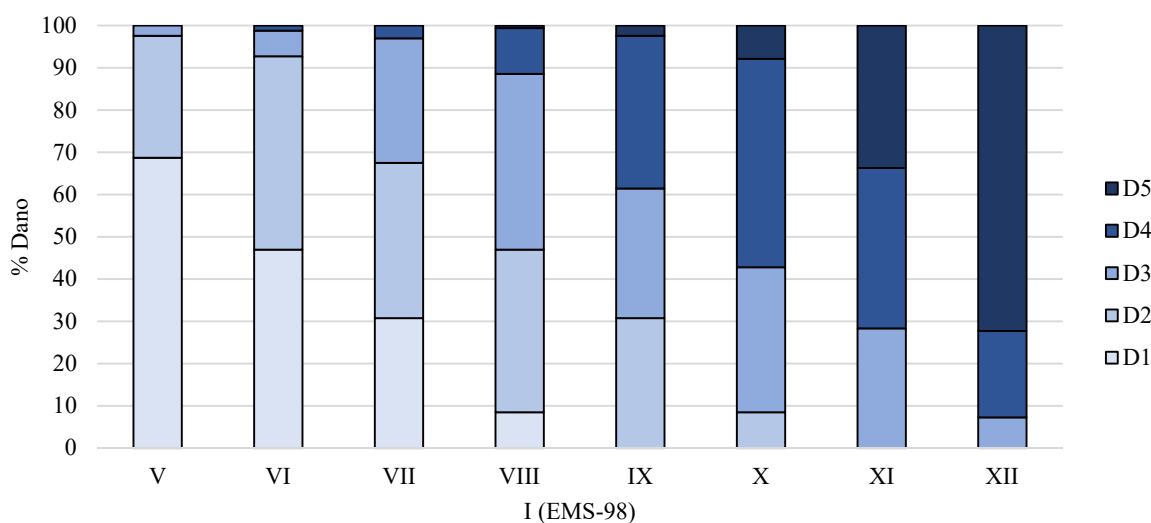


Figura 32 - Distribuição do grau de dano para diferentes intensidades sísmicas.

De seguida, com auxílio da ferramenta SIG, apresenta-se a distribuição dos valores do grau de dano médio, μ_D , para cada um dos 166 edifícios avaliados. Nas Figura 33 a 36 observam-se respetivamente cenários de dano para ações sísmicas caracterizadas por intensidades de VII a X, optou-se por representar estas intensidades macrosísmicas devido ao registo sísmico histórico que se fez sentir na cidade de Faro. Assim, através do mapeamento do grau de dano médio, permitiu identificar os edifícios mais vulneráveis.



Figura 33 - Cenário de dano para $I(EMS-98) = VII$.



Figura 34 - Cenário de dano para $I(EMS-98) = VIII$.

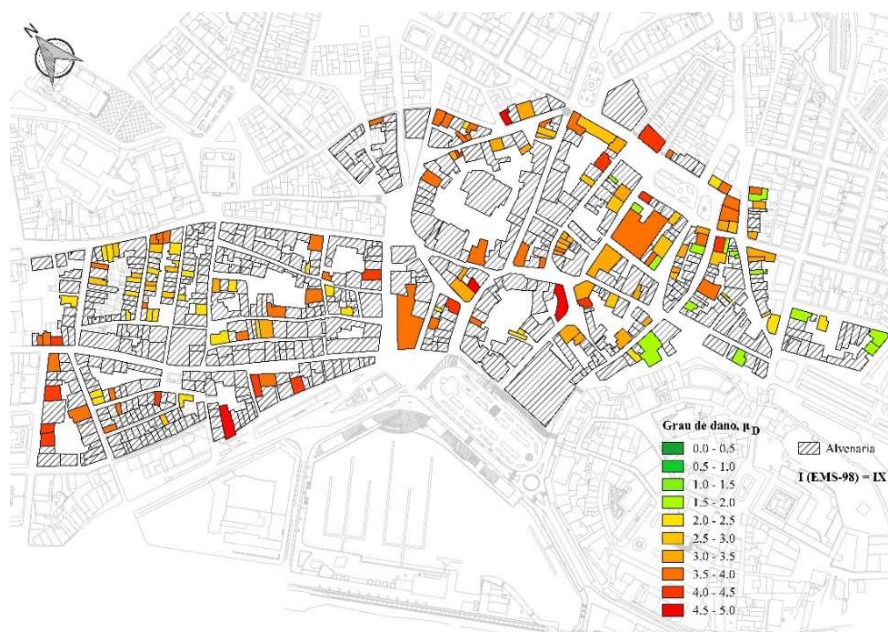


Figura 35 - Cenário de dano para $I(EMS-98) = IX$.

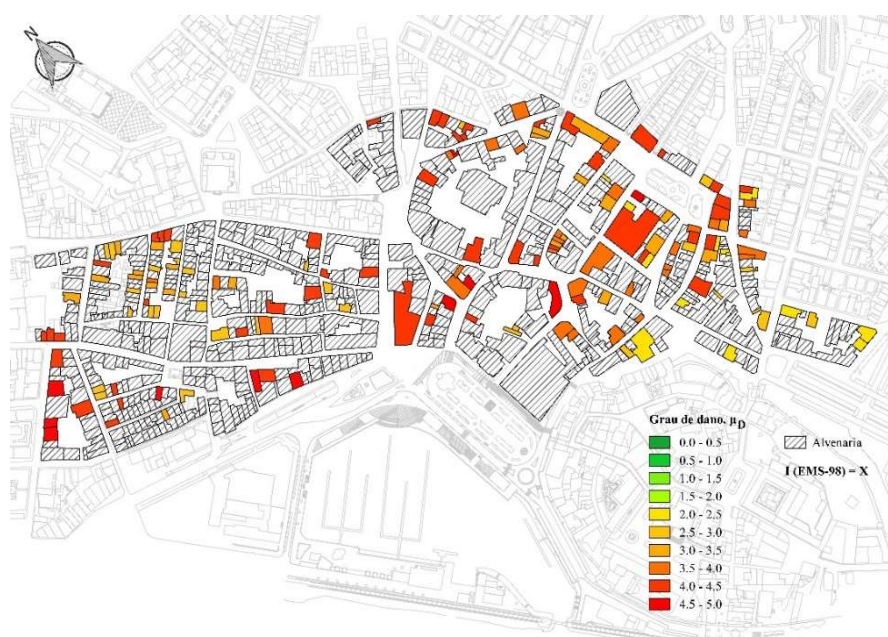


Figura 36 - Cenário de dano para $I(EMS-98) = X$.

5.6. Comentários Finais

No presente capítulo aplicou-se a metodologia simplificada à malha urbana da cidade de Faro. Após avaliação dos parâmetros descritos no capítulo 3 obteve-se o índice de vulnerabilidade de cada um dos edifícios. Em geral, o I_v dos edifícios é relativamente baixo, apenas uma pequena percentagem tem um índice de vulnerabilidade superior a 50. No entanto, caso não existisse a presença de pisos comerciais no rés-do-chão, que poderá provocar mecanismo de *soft-storey*, os valores dos índices de vulnerabilidade seriam mais baixos, pois trata-se de um dos parâmetros com maior ao peso. Mesmo assim, o I_v médio é igual a 29.36. Este facto indica que eventuais soluções para redução e mitigação dos efeitos de um sismo em estruturas de betão armado nesta área poderia passar pela redução da probabilidade de ocorrência de mecanismos tipo *soft-storey*, como será explorado no capítulo seguinte.

Após determinação dos índices de vulnerabilidade de cada um dos edifícios foi possível estimar o grau de dano para diferentes intensidades macrosísmicas, I (EMS-98). Para as intensidades sísmicas entre V e VIII, uma grande percentagem dos edifícios apresenta danos entre D1 e D3, ou seja, as estruturas poderão sofrer danos leves (danos não estruturais) até danos severos (danos estruturais moderados). Para as intensidades mais elevadas, entre X e XII, como já esperado, os edifícios poderão sofrer danos entre D3 e D5. Nas intensidades XI e XII, cerca de 20% e 72%, respetivamente, dos edifícios poderá sofrer o colapso.

No capítulo seguinte é apresentado uma ação de reforço que conduzirá a uma redução do índice de vulnerabilidade das estruturas de betão armado, e consequentemente a estimativa do grau de dano também irá diminuir. Assim, pretende-se fazer uma análise comparativa entre os resultados de pré e pós-reforço das estruturas.

**AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA
AÇÃO DE REFORÇO SÍSMICO**

6. AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA AÇÃO DE REFORÇO SÍSMICO

De acordo com a avaliação da vulnerabilidade sísmica descrita no capítulo anterior, os edifícios analisados que apresentam maior índice de vulnerabilidade estão sujeitos a eventuais mecanismos *soft-storey*. Assim, uma forma de reduzir a vulnerabilidade sísmica poderia passar por reduzir a probabilidade de ocorrência deste mecanismo, introduzindo soluções de reforço. Desta forma, optou-se por aplicar uma solução de reforço a partir de dissipadores de energia no piso térreo. Esta solução, já estudada em detalhe para outros edifícios em Furtado *et al.* (2015) permite corrigir o mecanismo de *soft-storey*, com soluções leves e que se podem enquadrar na arquitetura dos edifícios, e se bem dimensionada não requerem o reforço das fundações. Assim sendo, foi considerada a implementação desta solução de reforço nos 101 edifícios anteriormente avaliados com uma classe de vulnerabilidade D no parâmetro relativo ao mecanismo de *soft-storey* passando assim a ter uma classe de vulnerabilidade A.

6.1. Reavaliação do Índice de Vulnerabilidade - parâmetro P6

A alteração da classe de vulnerabilidade do parâmetro P6 irá conduzir a uma diminuição do índice de vulnerabilidade. Assim, obteve-se um I_v de 19.18 e um desvio de padrão, σ_{I_v} , de 8.94, ou seja, o I_v e o σ_{I_v} têm um decréscimo de aproximadamente 35% e 33%, respetivamente, em relação ao valor inicial. Na Figura 37 é apresentado o histograma de distribuição de valores dos índices de vulnerabilidade, pré e pós-reforço. Tal como se pode observar o índice de vulnerabilidade diminuiu de forma significativa. Cerca de 98% dos edifícios têm uma classe de vulnerabilidade inferior a 40, enquanto apenas 2% apresenta um I_v entre 40 e 50. Tal como se verifica através da Figura 37, após a intervenção nas estruturas, nenhum edifício tem um I_v superior a 50, o que não acontecia na análise inicial. O índice de vulnerabilidade máximo e mínimo é de 49.6 e 3.33, respetivamente.

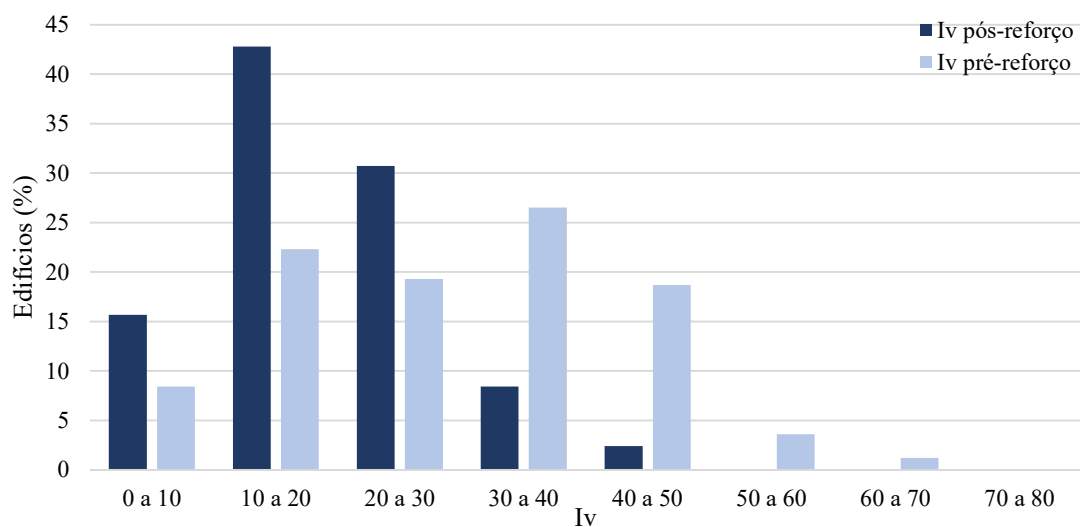


Figura 37 - Comparação dos índices de vulnerabilidade de pré e pós-esforço.

Na Figura 38 é apresentado a distribuição espacial dos índices de vulnerabilidade pré e pós dos edifícios em betão armado. Após comparação do mapeamento dos valores de pré e pós- reforço revela-se que existe uma diferença na escala de cores devido à redução dos índices de vulnerabilidade dos edifícios que sofreram a intervenção.



Figura 38 - Distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade a) pré-reforço e b) pós-reforço.

6.1.1. Reavaliação da estimativa de dano

Após a determinação dos novos índices de vulnerabilidade para cada um dos edifícios, estimaram-se os novos graus de dano recorrendo ao procedimento apresentado anteriormente. Na Figura 39, são apresentadas as curvas de vulnerabilidade do pré e pós-reforço, construídas através do $I_{vmédio}$, do $I_{vmédio} + \sigma$, do $I_{vmédio} - \sigma$, do $I_{vmédio} + 2\sigma$ e do $I_{vmédio} - 2\sigma$.

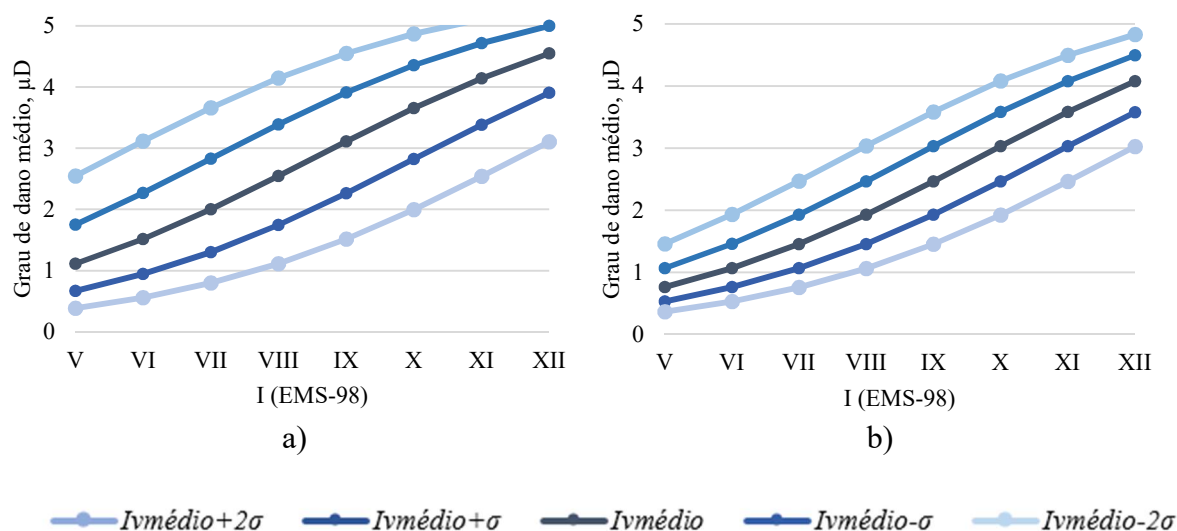


Figura 39 - a) Curvas de vulnerabilidade pré-reforço. b) Curvas de vulnerabilidade pós-reforço.

Na Figura 40 apresenta-se a distribuição do grau de dano relativo, do pré e pós-reforço, pelas diferentes intensidades sísmicas. Como já esperado, após reforço das estruturas, os graus de dano decréscem. Uma vez que o índice de vulnerabilidade dos edifícios tem uma influência direta no grau de dano e visto que o valor do I_v diminui, em consequência o grau de dano também diminui. Um dos exemplos, deste decréscimo é na intensidade sísmica XII. Neste caso, a percentagem de dano D5 pós-reforço é bastante mais baixa em relação aos valores iniciais, o que significa que diminui o número de edifícios que sofrem o colapso.

A título de exemplo, para a intensidade X, observa-se uma diminuição na percentagem de edifícios com grau de dano D4, consequentemente, os valores de o grau de dano D3 e D2 aumentam, assim uma grande percentagem de edifícios irá sofrer danos estruturais moderados e ligeiros respetivamente.

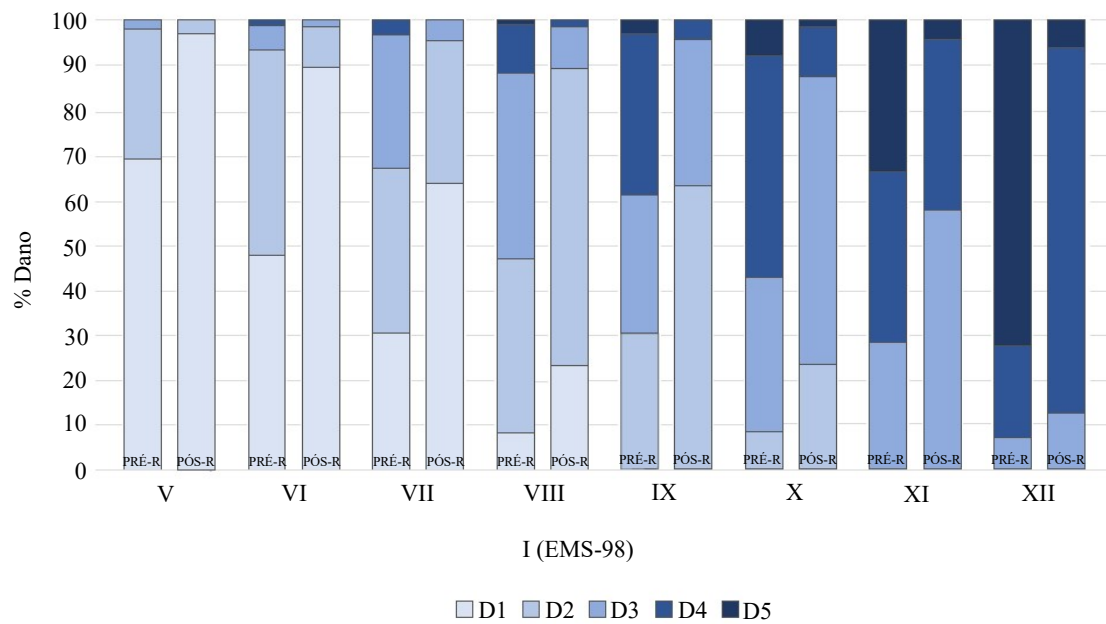


Figura 40 - Distribuição do grau de dano pelas diferentes intensidades macro sísmicas (PRÉ-R: pré-reforço e PÓS-R: pós-reforço).

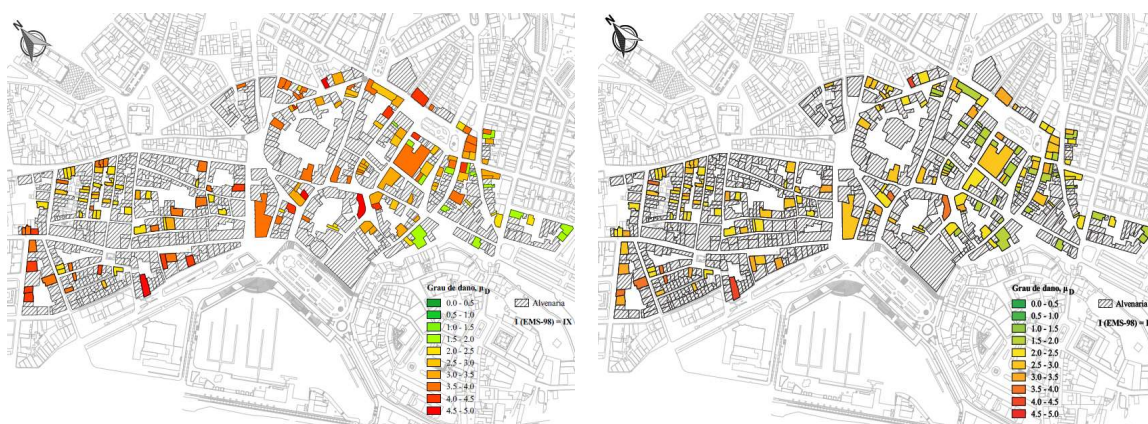
Na Figura 41 a 44 são apresentados os cenários de dano para ações sísmicas caracterizadas por intensidade, I (EMS-98), entre VII e X. Através da observação das figuras nota-se uma grande diferença na escala de cores para a mesma intensidade após aplicação da ação de reforço.



Figura 41 - Cenário de dano para I (EMS-98) = VII, a) pré-reforço e b) pós-reforço.



a) b)
Figura 42 - Cenário de dano para $I (EMS-98) = VIII$, a) pré-reforço e b) pós-reforço.



a) b)
Figura 43 - Cenário de dano para $I (EMS-98) = IX$, a) pré-reforço e b) pós-reforço.



a) b)
Figura 44 - Cenário de dano para $I (EMS-98) = X$, a) pré-reforço e b) pós-reforço.

6.2. Construção de curvas de fragilidade

As curvas de fragilidade são outra forma de representar o dano esperado, definindo a probabilidade de excedência de um determinado grau. Estas são obtidas diretamente da função de densidade beta cumulativa, para um determinado valor do índice de vulnerabilidade.

As curvas de fragilidade definem uma relação entre a intensidade sísmica e o dano, em termos de uma função de probabilidade contínua, expressando assim a probabilidade cumulativa condicional de atingir ou superar determinado estado de dano.

As probabilidades discretas, $P(D_K = d)$, são obtidas pela diferença das probabilidades cumulativas, $P_D[D_i \geq d]$, como representado na Expressão (6.1) (Ferreira, 2010).

$$P(D_K = d) = PD[D_K \geq d] - PD[D_{K+1} \geq d] \quad (6.1)$$

Na Figura 45 apresenta-se as curvas de fragilidade para o índice de vulnerabilidade médio inicial igual a 29.36, e para um índice de vulnerabilidade médio pós-reforço de 19.18.

Tal como se pode observar na Figura 45 e como já esperado, após reforço das estruturas, as probabilidades de excedência do grau de dano sofrem uma diminuição. A título de exemplo, a probabilidade de excedência do grau de dano D3 para um sismo com intensidade VIII diminui cerca de 30%.

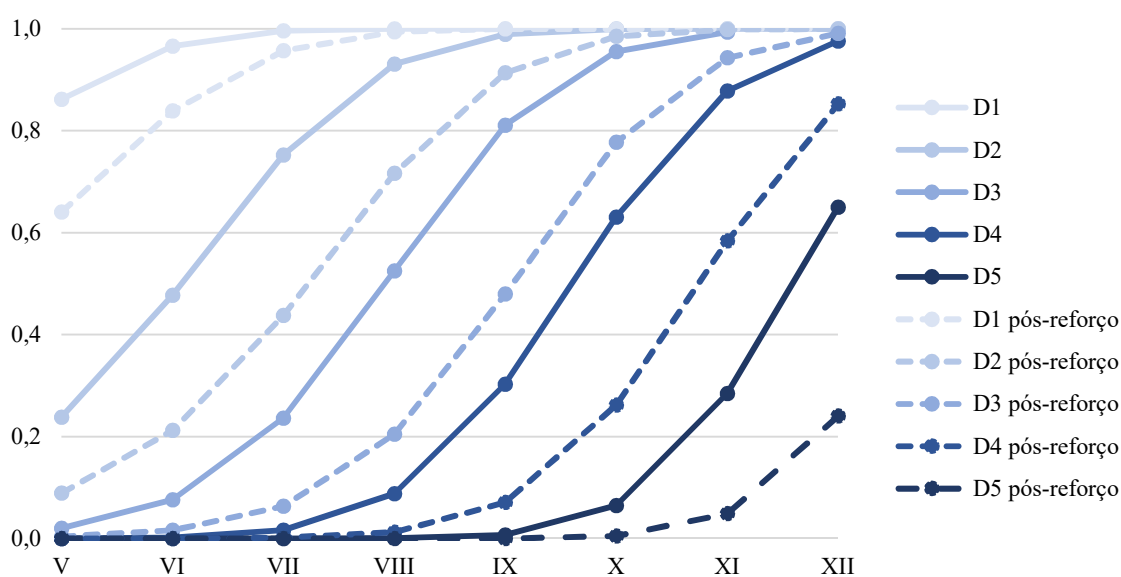


Figura 45 – Comparação das curvas de fragilidade para $I_v=29.36$ e $I_v=19.18$.

6.3. Perdas económicas e estimativa de custos de reparação

Na presente secção pretende-se analisar a viabilidade económica de forma a comparar custos/benefícios da intervenção descrita anteriormente.

O custo relativo é o quociente entre o custo total do reforço e o custo total da construção do edifício, como representado na Expressão (6.2).

$$\text{Custo relativo} = \frac{\text{Custo do reforço} \times \text{Área em planta}}{\text{Área de construção} \times \text{Custo de construção}} \quad (6.2)$$

Tendo em conta que o reforço das estruturas é uma intervenção feita apenas no piso de rés-do-chão a partir de dissipadores de energia, Furtado (2015) indica um custo médio de 80€/m² para a solução de reforço em causa. Para custo de construção teve-se em conta o valor patrimonial médio dos edifícios. Assim, assumiu-se um valor de 750€/m².

Na Figura 46 apresenta-se a distribuição do custo relativo dos edifícios que sofreram uma intervenção. Para além disso, representa-se o índice de vulnerabilidade dos 101 edifícios que foram reforçados, de modo a observar a redução do I_v após a intervenção. De forma a facilitar a análise, os edifícios encontram-se organizados pelo número de pisos.

Através da Figura 46 observa-se que o custo relativo varia entre 1.5% e os 5.3%. As estruturas com menos pisos apresentam um custo relativo superior aos edifícios com mais pisos, isto resulta, naturalmente, do facto da intervenção ser feita apenas no rés-do-chão e da área de construção ser inferior. Assim, a relação entre o custo total do reforço e o valor total da construção tem valores superiores nos edifícios com menos pisos. Nos edifícios com 6 e 7 pisos, o custo relativo é inferior a 2% do valor da construção.

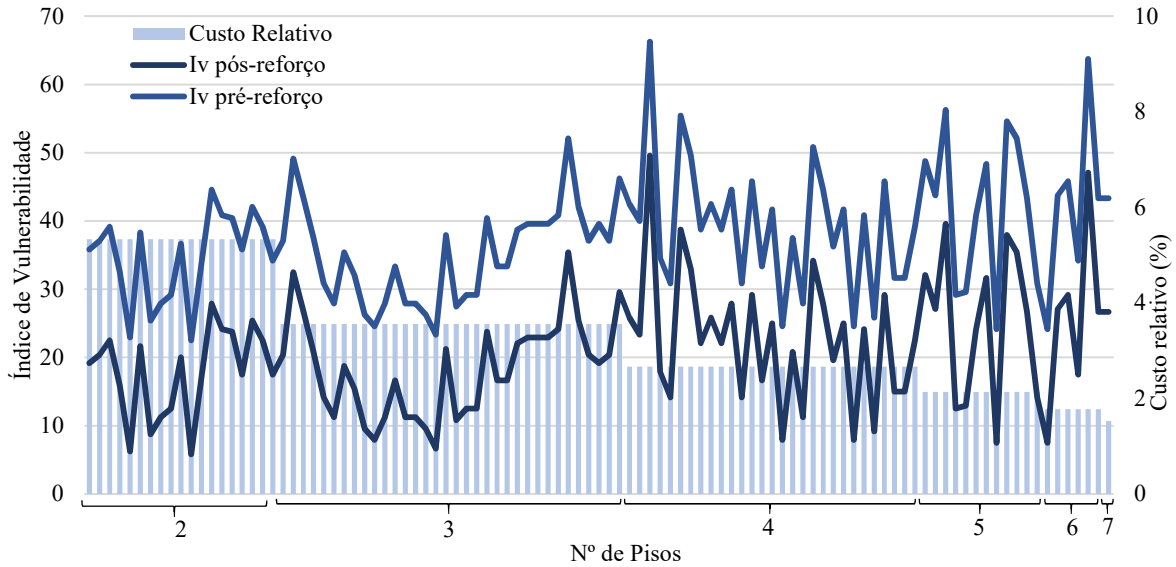


Figura 46 - Relação entre os Índices de Vulnerabilidade e o custo relativo.

Após a determinação do grau de dano médio é possível interpretar os dados através de um índice económico, aplicando-se quociente entre o custo de reparação e o de substituição (Benedetti&Petrini, 1984). A correlação entre os graus de dano e os custos de reparação e reconstrução é obtida pelo processamento e tratamento de dados pós-sismos (Dolce *et al.*, 2006).

Com recurso à Expressão (6.3), é possível estimar os custos de reparação para um sismo de intensidade I , através do produto da probabilidade condicionada do custo de reparação ao nível do dano, $P[R \setminus DK]$ e da probabilidade condicionada do dano à vulnerabilidade do edifício e à intensidade sísmica $P[DK \setminus Iv, I]$ (Ferreira, 2010).

$$P[R \setminus I] = \sum_{DK=1}^5 \sum_{I_v=1}^{100} P[R \setminus D_K] \times P[D_K \setminus I_v, I] \quad (6.3)$$

O custo de reparação associado foi estimado a partir dos valores médios dos índices de vulnerabilidade pré e pós-reforço, $I_v \text{ médio}=29.36$, $I_v \text{ médio}=19.18$, respetivamente. Na Figura 47 apresenta-se a estimativa do custo de reparação para os diferentes índices de vulnerabilidade para toda a área de estudo em função da intensidade sísmica. Para além disso representou-se a relação entre o grau de dano (μ_D) e o grau de dano após intervenção ($\mu_{Dint.}$).

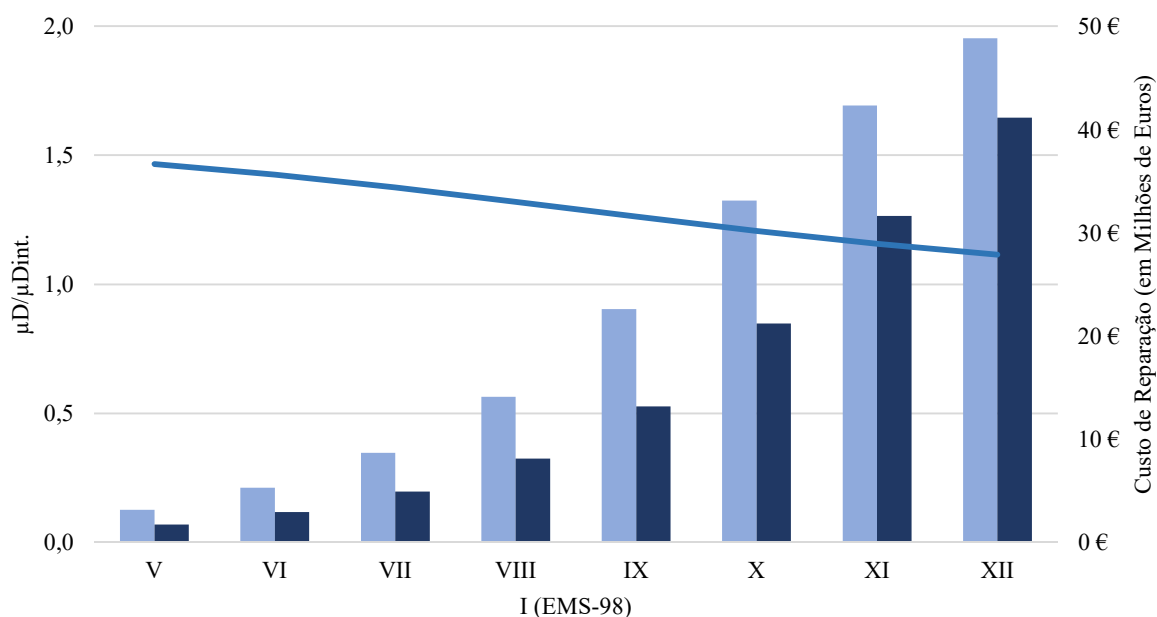


Figura 47 - Estimativa de custo de reparação.

Como se pode observar, a relação dos graus de dano pré e pós- reforço reduz à medida que a intensidade aumenta. Nas intensidades mais baixas, a relação entre os graus de dano apresenta valores superiores, uma vez que o reforço das estruturas tem maior influência nestas intensidades. Após intervenção nos edifícios, a estimativa de custos de reparação reduz de forma significativa. A intensidade X merece particular atenção, uma vez que, para além de corresponder à intensidade histórica máxima registada na cidade de Faro, apresenta a maior diferença de custo de reparação entre os edifícios que não sofreram intervenção e os que sofreram.

O balanço económico é a subtração entre o custo de reparação sem reforço, $C. R_{pré-reforço}$, e o custo total da reparação com reforço, sendo este determinado através da soma entre o custo de reparação com reforço, $C. R_{pós-reforço}$, e o custo do reforço, $C. Ref.$, como representado na Expressão (6.4).

$$Balanço\ económico = C. R_{pré-reforço} - [C. R_{pós-reforço} + C. Ref.] \quad (6.4)$$

Na Figura 48 representa-se os resultados do balanço económico de toda a área de estudo em função da intensidade. Tal como se pode observar, a intensidade X é onde se verifica um maior valor no balanço económico. Conclui-se assim que, embora o reforço seja eficiente

para todo o espectro de intensidades sísmicas analisadas, a sua eficiência sofre uma redução progressiva para intensidades superiores a X.

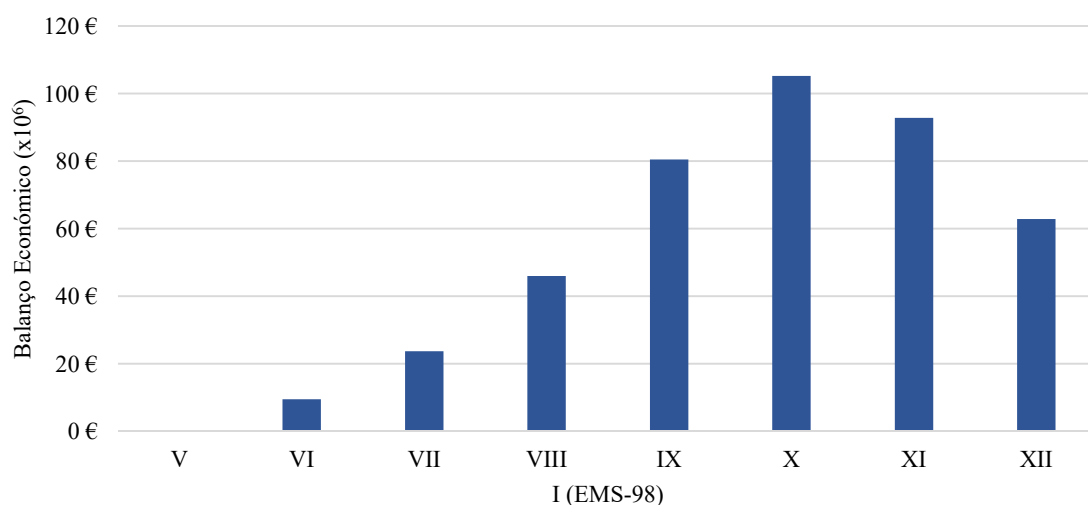


Figura 48 - Balanço económico.

6.4. Comentários Finais

Uma das principais preocupações no presente capítulo foi a diminuição do valor do índice de vulnerabilidade e consequente grau de dano. Assim, optou-se por aplicar nos edifícios com zona comercial no rés-do-chão uma solução de reforço. Como esperado os valores do índice de vulnerabilidade e de grau de dano diminuíram de forma significativa.

Neste capítulo foi analisado o reforço nas estruturas do ponto de vista económico, assumindo-se um custo de reparação e um custo de construção de forma a perceber se após o reforço das estruturas, o investimento era recuperável após a ocorrência de um sismo. A partir da análise do balanço económico é possível concluir que a ação do reforço é eficiente independentemente da intensidade sísmica. Para além disso, o reforço das estruturas poderá prevenir feridos graves e mortes.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação debruçou-se sobre o tema da avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios de betão armado de uma zona urbana da cidade de Faro, e do estudo de benefício da implementação de uma solução de reforço. Este trabalho foi dividido em três fases: na primeira fase, aplicou-se uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica a um conjunto de edifícios, com o objetivo de estimar os cenários de dano. Na segunda fase, procedeu-se à definição de uma intervenção nos edifícios que apresentavam suscetibilidade de despoletar um mecanismo *soft-storey*, e de forma a analisar a eficiência de uma solução de reforço na redução da sua vulnerabilidade sísmica foi alterado parâmetro – P6. Na terceira e última fase, analisaram-se os resultados após reforço por comparação com a situação original (pré-reforço) do ponto de vista económico.

7.1.Principais Conclusões

A metodologia utilizada baseia-se na consulta e utilização de informação pouco detalhada, nomeadamente informação genérica das ARUs, documentação fotográfica e inspeção tipo *Sidewalk* ou “*Street View*”, podendo ser aplicada em larga escala. Esta metodologia poderá levar a eventuais imprecisões devido à omissão de alguma informação para a classificação dos parâmetros. No entanto, a aplicação desta metodologia permite uma análise rápida e com recurso a pouca informação, tendo particular interesse numa ação preliminar de “*rapid screening*” de modo a identificar edificado mais vulnerável à ações horizontais.

Determinada a vulnerabilidade sísmica é possível estimar o grau de dano médio associado a cada edifício, quando sujeito a uma determinada intensidade macrosísmica. Quanto mais vulnerável for um edifício, maior será o grau de dano expectável, independentemente da intensidade sísmica. Através desta avaliação é possível desenvolver cenários de dano que permitem apoiar o estudo de risco sísmico. A integração da ferramenta SIG facilita a análise espacial dos resultados obtidos numa zona urbana com muitos edifícios.

Neste caso particular, a maioria dos edifícios da zona urbana em estudo são constituídos por zona comercial no piso térreo, o que potencia o desenvolvimento do mecanismo *soft-storey*. Assim, de forma a prevenir essa fragilidade estrutural, sugere-se a intervenção de reforço a partir de dissipadores de energia. Para além de ser uma intervenção feita ao nível do

res-do-chão, é uma das intervenções com menor custo associado. Após o reforço dos edifícios, o valor recalculado do índice de vulnerabilidade, I_v , é mais baixo e consequentemente os danos físicos estimados serão menores.

Atualmente, uma das questões mais importante é o fator económico. O reforço de uma estrutura é uma intervenção que poderá significar um investimento no presente, mas que terá uma grande influência no futuro. O investimento no reforço das estruturas, poderá ser recuperado após a ocorrência de sismo, apesar da eficiência do reforço sofrer uma redução progressiva a partir das intensidade X. Para além disto, importa referir que este reforço das estruturas pode prevenir muitos feridos, bem como em casos de forte ação sísmica, a morte de muitas pessoas.

7.2.Perspetiva de trabalhos futuros

Portugal, nomeadamente o Algarve, está associado a uma perigosidade sísmica moderada a elevada, o que torna cada vez mais importante o estudo da vulnerabilidade sísmica do edificado existente. Assim, relativamente trabalhos futuros, sugere-se:

- Melhorar a informação com base nos dados do solo/idade dos edifícios;
- Alargar o caso de estudo a outros bairros da cidade de Faro com o intuito de analisar possíveis cenários de dano;
- Aplicar a metodologia simplificada a outros casos de estudo, nacionais e internacionais.
- Desenvolver um algoritmo de estimativa de perdas económicas e humanas, à semelhança do que existe já para o edificado em alvenaria;
- Comparar com estudos realizados na mesma área para outras tipologias de edifícios;
- Analisar a relação custo/benefício de outras soluções de reforço/melhoria do comportamento sísmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATC-13 (1985). Earthquake damage estimation data for California. Applied Technology Council, Redwood City, California.

ATC-21. (2002). Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook (FEMA154). Redwood City: Applied Technology Council, FEMA 154, Edition 2

Bal, I. E., Tezcan, S., & Gulay, G. (2006). Advanced applications of the p25 scoring method for the rapid assessment of rc buildings. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, September 3-8, Geneva, Switzerland.

Benedetti, D. & Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: *Proposte di un metodo di valutazione. L'industria delle Costruzioni*.

Bhatt, C. A. F. (2007). *Análise Sísmica de Edifícios de Betão Armado segundo o Eurocódigo 8 – Análises Lineares e Não Lineares*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Câmara Municipal de Faro (2011). “Área de Reabilitação Urbana – Bairro Mouraria”.

Câmara Municipal de Faro (2011). “Área de Reabilitação Urbana – Bairro Ribeirinho”.

Carocci, C. (1996). *Conservazione e sicurezza dei centri storici in area sismica: vulnerabilità e mitigazione*, PhD Thesis on Storia delle Scienze e delle Tecniche del Costruire, Roma.

Carvalho, E. (2004). *Prevenção e Protecção das Construções Contra Riscos Sísmicos – Eurocódigos Estruturais*. Lisboa: Edições Fundação Luso-Americana. Retrieved from - <http://www.flad.pt/wp-content/uploads/2014/05/livro27.pdf>

CEN. (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1: 2004). European Committee for Normalization, Brussels (Vol. 1).

D’Ayala, D., & Speranza, E. (2002). *An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings*. *disp*, 3(1), 3-3. *12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, UK. University of Bath, UK.

Diniz, M. B. (1981). *Arquitectura Civil em Faro Após o Terramoto de 1755*, Câmara Municipal de Faro, Faro.

Dolce, M., Kappos, A., Masi, A., Penelis, G., & Vona, M. (2006). “*Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies*”. Elsevier, Engineering Structures, 28:357-371.

Ferreira, C. (2008). *Vulnerabilidade sísmica do parque edificado na cidade de Aveiro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Ferreira, T. (2009). “Avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachada de edifícios em alvenaria”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

Ferreira, T. (2010). “Avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos – aplicação ao núcleo urbano antigo do seixal”, Dissertação de Estudos Avançados em Reabilitação do Património Edificado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal,

Ferreira, T. (2015). “*Out-of-plane Seismic Performance of Stone Masonry Walls: Experimental and Analytical Assessment*.” Universidade de Aveiro. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Furtado, A., Rodrigues, H., Varum, H., & Costa, A. (2015). “*Evaluation of different strengthening techniques’ efficiency for a soft storey building*”. Journal of Environmental and Civil Engineering.

GNDT-SSN. (1994). Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo e secondo livello (murata e cemento armato). *Gruppo Nazionale per La Difesa Dai Terremoti, Roma*. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.

Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales. *European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales, Conseil de l’Europe*

Hirosawa, M., Sugano, S., & Kaminosono, T. (1993). Seismic evaluation method and restoration techniques for existing and damaged buildings developed in Japan. In *Retrofitting and restration of buildings in Japan* (pp. 1-69). International Institute of Seismology and Earthquake Engineering; Building Research Institute; Ministry of Construction.

Instituto Nacional de Estatística (2011). “*Censos 2011. Resultados Definitivos, Portugal*”

Lopes, M. (2008). Conceção de Estruturas. Sismos e Edifícios. (1ª edição), Lisboa, Edições Orion.

Maio, R., Ferreira, T., Vicente, R., Estêvão, J. (2015a). “Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: case study of the old city centre of Faro, Portugal”, *Journal of Risk Research*; Taylor & Francis. 19(5), 551-580. doi: 10.1080/13669877.2014.988285.

Maio, R., Ferreira, T., Vicente, R. (2015b). “A morfologia dos núcleos urbanos antigos: levantamento arquitetónico e construtivo do Bairro Ribeirinho de Faro, Portugal”; *Conservar Património*, nº21, 2015, pp. 5-24, português, DOI: 10.14568/cp2015002.

Medvedev, S. V., & Sponheuer, W. (1969). MSK Scale of seismic intensity. In *Proc. IV World Conference of the Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.

Marecos, J.; Castanheta, M. (1970). Estudo do Comportamento de Estruturas sob a Ação do Sismo de 28 de Fevereiro de 1969, LNEC, Lisboa (1970)

QGIS (2007). Open Source Geospatial Foundation.

Rai, D. C. (2008). A generalized method for seismic evaluation of existing buildings. *Current science*, 94(3), 363-370.

REBAP. (1983). *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado*. (L. Imprensa Nacional - Casa da Moeda, Ed.). Lisboa: Decreto-Lei n.º349-C/83.

Rodrigues, H. (2005). *Desenvolvimento e Calibração de Modelos Numéricos para a Análise Sísmica de Edifícios*. Dissertação de mestrado. Estruturas de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, Portugal. Retrieved from <http://repositorioaberto.up.pt/handle/10216/12248>.

Rodrigues, L. (2009). *Metodologias Simplificadas de Avaliação Sísmica de Edifícios de BA*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Rojahn, C. & Sharpe, R. (1985). ATC-13: Earthquake Damage Evaluation Data for California. Applied Technology Council, Redwood City, CA

Romãozinho, M. (2008). Dimensionamento para a Ação do EC8, Análise das Prescrições da EN 1998-1 Aplicadas a Estruturas de Edifícios de Betão Armado com Recurso a um Exemplo prático. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137606890/Dissertacao.pdf>.

Sandi, H., & Floricel, I. (1994). Analysis of seismic risk affecting the existing IX building stock. In *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*.

Santos, R. R. dos. (2011). Modelação de paredes resistentes em edifícios de betão armado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/5180>

Silva, J. (2015). “Metodologia de Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica de Edifícios em Betão Armado.”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Speranza, E. (2003). An integrated method for the assessment of the seismic vulnerability of historic buildings. PhD thesis, University of Bath, UK.

Sucuoglu, H., & Yazgan, U. (1999). Simple Survey Procedures for Seismic Risk Assessment In Urban Building Stocks. *Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, NATO Science Series IV*.

Vicente, R. (2008). “Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra.” Universidade de Aveiro. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Yakut, A., Erberik, A., Akkar, S., & Sucuoglu, H. (2012). Rapid Seismic Assessment Procedures for Turkish Building. In *Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures*. Springer International Publishing.

Whitman R.V., Reed, J. W., & Hong, S.T. (1973). “*Earthquake damage probability matrices*”. Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, 2; 1973. p. 2531–2540.

ANEXO

ANEXO

Tabela A. 1 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P1. Fonte: (Silva,2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|------------------------------------|-------------------|---|
| P1- Implantação do edifício | E | Informação de origem direta, isto é, através da observação visual <i>in situ</i> por meio de prospeções locais para avaliar o tipo de terreno, a sua consistência, (abertura de valas de inspeção para sondagens com ou sem extração para avaliar o solo subjacente à fundação, consulta de cartas geológicas, etc.), ou ainda, pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas, pormenores e informação escrita referente às soluções. Informação com um grau de confiança próximo do exato. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação acerca das condições do terreno, medição do declive dos arruamentos e ainda de informação oral credível. |
| | B | Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Tabela A. 2 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P2. Fonte: (Silva,2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|-----------------------------|-------------------|--|
| P2 - Contexto urbano | E | Informação de origem direta, isto é, através da observação visual pelo exterior do edifício. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias e ainda de informação oral credível. |
| | B | Baseada em informação oral, em que não é possível visitar o local. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Tabela A. 3 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P3. Fonte: (Silva,2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|------------------------------|-------------------|---|
| P3- Idade do edifício | E | Informação de origem direta, isto é, através da consulta de um registo ou projeto de com a referente data de construção (se existente). Informação com um grau de confiança próxima do exato. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível. |
| | B | Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Tabela A. 4 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P4. Fonte: (Silva,2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|-------------------------------------|-------------------|--|
| P4- Irregularidade em planta | E | Informação de origem direta, isto é, através de medição <i>in situ</i> ou ainda pela consulta de um registo geométrico à escala pós-construção se existente) ou informação escrita referente à geometria. Informação necessária ao rigoroso cálculo das excentricidades em planta. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias e elementos sem escala e ainda de informação oral credível |
| | B | Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Tabela A. 5 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P5. Fonte: (Silva,2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|-------------------------------------|-------------------|---|
| P5- Irregularidade em altura | E | Informação de origem direta, se for possível a identificação de todas as soluções construtivas através da observação visual, consulta de um registo geométrico rigoroso (se existente) das suas peças desenhadas, pormenores e informação escrita referente a tipologia e constituição das soluções. Informação necessária ao rigoroso cálculo. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias e elementos sem escala e ainda de informação oral credível. |
| | B | Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Tabela A. 6 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P6. Fonte: (Silva,2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|---|-------------------|---|
| P6- Existência de Mecanismo de Soft-storey | E | Informação de origem direta, isto é, através da observação visual <i>in situ</i> ou ainda pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas. Informação com um grau de confiança próxima do exato. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções com elementos não-estruturais semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível. |
| | B | Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Tabela A. 7 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P7. Fonte: (Silva, 2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|---------------------------------------|-------------------|---|
| P7- Presença de pilares curtos | E | Informação de origem direta, isto é, através da observação visual <i>in situ</i> ou ainda pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas. Informação com um grau de confiança próxima do exato. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções com elementos não-estruturais semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível. |
| | B | Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

Tabela A. 8 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P8. Fonte: (Silva, 2015).

| Parâmetro | Grau de confiança | Nível de informação |
|-----------------------------|-------------------|--|
| P8- Outros elementos | E | Informação de origem direta, isto é, através da observação visual <i>in situ</i> por meio de prospeção localizada e desmontagem local ou ainda pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas, pormenores e informação escrita referente aos elementos não estruturais. |
| | M | Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções com elementos não-estruturais semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível. |
| | B | Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época. |
| | A | Informação adotada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa. |

